

Vliv teploty na mechanické vlastnosti vybraných elastomerů

Jan Barcuch

Bakalářská práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Barcuch**

Osobní číslo: **T11211**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv teploty na mechanické vlastnosti vybraných elastomerů**

Zásady pro vypracování:

1. Literární přehled
2. Příprava experimentu
3. Experiment
4. Vyhodnocení výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

30. ledna 2015

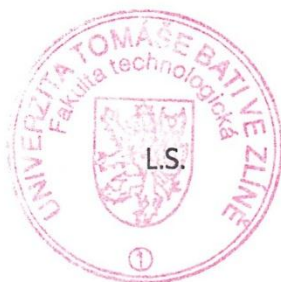
Termín odevzdání bakalářské práce:

22. května 2015

Ve Zlíně dne 9. února 2015

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: BARCUCH JAN

Obor: PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20. 5. 2015

Barcuch Jan

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo určit vlastnosti materiálů, používaných pro výrobu pneumatik, za různých teplotních podmínek.

Byla provedena tahová zkouška při čtyřech různých teplotách. Z výsledných hodnot se sestavil graf v závislosti na napětí a poměrného prodloužení.

Z výsledných hodnot a grafů jsou pak patrné vlastnosti daných materiálu při konkrétních teplotách.

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the characteristics of the materials used for the production of tires under different temperature conditions.

Tensile test was conducted at four different temperatures. A chart of stress and relative elongation is compiled from the resulting values.

Characteristics of the material at specific temperatures are evident from the resulting values and graphs

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jakubu Javoříkovi Ph.D, za pomoc, poskytnuté podklady a cenné připomínky při tvorbě mé bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, 20. 5. 2015

Banard

.....

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VLASTNOSTI HYPERELASTICKÉHO MATERIÁLU	12
1.1 ZÁKLADNÍ TYPY HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ	13
1.1.1 Přírodní kaučuk (NR).....	13
1.1.2 Chloroprenový kaučuk (CR).....	13
1.1.3 Polyisopren (IR).....	13
1.1.4 Butadienový kaučuk (BR).....	13
1.1.5 Butadienstyrenový kaučuk (SBR).....	14
1.1.6 Butadienakrylonitrilový kaučuk (NBR).....	14
1.1.7 Butylkaučuk (IIR)	14
1.1.8 Chromovaný a bromovaný kaučuk (CIIR a BIIR).....	14
2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ	15
2.1 OBECNÁ TEORIE ELASTICKÝCH DEFORMACÍ	15
2.2 OBECNÝ VZTAH MEZI NAPĚTÍ A DEFORMACÍ.....	16
2.3 JEDNOOSÁ NAPJATOST.....	16
2.4 DVOUOSÁ NAPJATOST	18
2.5 ČISTÝ SMYK	19
2.6 PŘEHLED HYPERELASTICKÝCH MODELŮ.....	20
2.6.1 Polynomická forma	20
2.6.2 Neo-Hookean	21
2.6.3 Yeoh	21
2.6.4 Mooney-Rivlin	22
2.6.5 Arruda-Boyce.....	23
2.6.6 Gent.....	23
2.6.7 Ogden	24
2.7 DYNAMICKÉ NAMÁHÁNÍ.....	24
2.8 VLIV TEPLoty NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	28
3 CÍL PRÁCE	29
4 POSTUP PRÁCE	30
4.1 MATERIÁLY	30
4.1.1 Seznam druhů směsí a jejich složení.....	30
4.2 TESTOVÁNÍ MATERIÁLU	31
4.2.1 Podstata zkoušky	31
4.2.2 Zkušební tělesa.....	32
4.2.3 Zkušební zařízení	32
4.2.3.1 Vysekávací a vyřezávací nože	32
4.2.3.2 Tloušťkoměr	33
4.2.3.3 Trhací stroj.....	33
4.2.3.4 Počet zkušebních těles	33
4.2.4 Postup zkoušky.....	34
4.2.5 Zkušební teplota	34

5	VÝSLEDKY ZKOUŠKY.....	35
5.1	MATERIÁL C	35
5.2	MATERIÁL D	37
5.3	MATERIÁL E.....	39
5.4	MATERIÁL F.....	41
5.5	MATERIÁL G	43
5.6	MATERIÁL H	45
5.7	MATERIÁL I.....	47
5.8	MATERIÁL K	49
5.9	MATERIÁL L.....	51
5.10	MATERIÁL O	53
5.11	MATERIÁL S	55
5.12	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLY	57
6	DISKUZE VÝSLEDKŮ	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Po objevení vulkanizace Charlesem Goodyearem v roce 1839 pronikl kaučuk do všech oblastí lidské práce a nacházel stále více uplatnění. Největší vliv na rozvoj gumárenského průmyslu měl rychle se rozvíjející automobilismus, hlavně díky pneumatikám. Dnes je kaučuk nepostradatelným materiálem.

Kaučukové hmoty jsou schopny značně se deformovat i malou silou a po uvolnění vnější síly se rychle vracejí téměř do původního stavu. Hmoty mající kaučukové vlastnosti při normální teplotě se nazývají elastomery.

Elastomery, označované také jako hyperelastické materiály, tvoří speciální třídu polymerů, která zahrnuje přírodní a syntetické pryže. Dříve slovo pryž (rubber) znamenalo materiál získaný z kaučukovitých rostlin ve formě latexu, především z rostlin *Hevea Braziliensis* a *Guayula*. Dnes se slovo pryž používá pro všechny materiály s vlastnostmi stejnými, jako má přírodní kaučuk.

Kaučukové materiály mají široké použití v inženýrství. Především jako absorbatory energie, tlumiče vibrací, těsnící prvky a hlavně ve výrobě pneumatik. Stále rostoucí využití pryží ve strojírenství vyžaduje přesnější analýzy charakteristik, zejména určení mechanických vlastností pryžových materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VLASTNOSTI HYPERELASTICKÉHO MATERIÁLU

Elastomerní materiály tvoří amorfni strukturu s dlouhými řetězci molekul, které jsou v nedeformovaném stavu stočené, nahodile orientované a značně pokrivené. Elastické protažení zatíženého materiálu je způsobeno při tahovém zatížení, kde se řetězce částečně narovnají. Řetězce se vrátí do původního stavu, když tahová síla přestane působit. Při vulkanizačním procesu vznikají příčné vazby mezi molekulami řetězce, toto chování je nazýváno hyperelastické. [1]

Hyperelastický (kaučukovitý) stav je definován jako vlastnost hmoty deformovat se poměrně malými vnějšími silami v takovém rozsahu, jaký jiné materiály neumožňují. Po uvolnění síly se vrací zcela úplně a rychle do původního stavu. Plasty do této skupiny ne-náleží, protože vykazují hyperelastický stav jen při vysokých teplotách. Za kaučuky se označují elastomery, které jdou vulkanizovat (sít'ovat) účinkem vulkanizačních činidel. Vyskytují se i termoplastické elastomery, které vulkanizaci nevyžadují. Spojení makromolekul vzniká fyzikálními vazbami.

Hlavní znaky hyperelasticity jsou [2]:

- Elastické deformace jsou velké, několikanásobně vyšší než u ideálně elastických látek.
- Deformace je velmi nelineární v závislosti na napětí. Tvar této závislosti má většinou esovitý průběh.
- Vlivem i malých sil se materiál deformuje.
- Objemová tuhost elastomerů je vysoká. Dosahuje hodnot až tisíců MPa.

1.1 Základní typy hyperelastických materiálů

1.1.1 Přírodní kaučuk (NR)

Přírodní kaučuk se zpracovává z rostlin, které obsahují tzv. latex. Kaučuk z latexu se získává mnoha způsoby. Nejčastěji se používá koagulace kyselinou mravenčí nebo octovou. Koagulát se přivádí mezi dva válce, kde je převeden na fólie o tloušťce 2-3 mm, následně je sušen horkým vzduchem.[3]

1.1.2 Chloroprenový kaučuk (CR)

Zhotoví se polymerací chloroprenu. Odborný název je NEOPREN. Vyznačuje se nízkou plynopropustností, má malou hořlavost a je samozhášivý. Díky jeho vysoké odolnosti se používá jako technická pryž pro hadice, těsnění, dopravní pásy, pogumování textilu. Čistá pryž má pevnost v tahu 430 – 580 kPa a tažnost 800 - 900%. [4]

1.1.3 Polyisopren (IR)

Jeho příprava je syntetická pomocí polymerace isoprenu. Díky nižší odolnosti proti oděru a vyšší tažnosti se využívá na výrobu směsí pro pneumatiky. Hodnota pevnosti tahu je přibližně 360 – 500 kPa. [4]

1.1.4 Butadienový kaučuk (BR)

Vyrábí se stereoregulární polymerací butadienu. Má vysokou odolnost proti oděru a dobrou stabilitu při vysokých teplotách. Využívá se především na výrobu směsí pro běhouny pneumatik a podlahoviny. Pevnost v tahu je přibližně 360 kPa a tažnost 500%. [5]

1.1.5 Butadienstyrenový kaučuk (SBR)

Jde o nejdůležitější druh syntetických kaučuků. Vyrábí se pomocí radikálové nebo aniontové polymerace. Vyznačuje se větší odolností proti oděru a dobrou zpracovatelností. Používá se na výrobu pneumatik jako technická pryž nebo pro impregnaci kordů a textilu. Čistá pryž má pevnost v tahu 30 – 43 kPa a tažnost 400 – 600%. [4]

1.1.6 Butadienakrylonitrilový kaučuk (NBR)

Výroba pomocí radikálové polymerace s 18 – 49% akrylonitrilu. Při vyšším obsahu akrylonitrilu roste jeho tvrdost a klesá botnavost a elasticita. Má dobrou odolnost proti povětrnosti. Využívá se na výrobu benzínových hadic, klínových řemenů, těsnění a dopravních pásů. Pevnost v tahu je 70 – 130 kPa a tažnost 300 – 700%. [4]

1.1.7 Butylkaučuk (IIR)

IIR kaučuky jsou kopolymery isobutylenu s 1 až 3% isoprenu, připravené kationovou polymerací při nízké teplotě. Jednotlivé druhy se navzájem liší obsahem isoprenu a viskozitou. Mají malou odrazovou pružnost a tedy vysoké mechanické tlumení a dobře elektroizolační vlastnosti. [3]

1.1.8 Chromovaný a bromovaný kaučuk (CIIR a BIIR)

Připravují se halogenací butylkaučuku (IIR). Mají vyšší lepivost než IIR a lze je použít do směsí s nenasycenými kaučuky jako je NR. Značná množství halogenovaných typů CIIR a BIIR jsou používána pro vnitřní gumu bezdušových pneumatik na bočnice a duše pneumatik. [3]

2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ

2.1 Obecná teorie elastických deformací

Rivinem bylo vyvinuto obecné řešení vztahu mezi napětím a deformací u pryžových materiálů.[7] Toto řešení plyne ze vztahu pro potenciál deformační energie (W), kde může být přímo funkcí hlavních protažení nebo funkcí deformačních invariantu:

$$W = W(I_1, I_2, I_3),$$

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3). \quad (13)$$

Napětí σ_{ij} je založen na deformačním potenciálu definovaném jako:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}}, \quad (14)$$

Kde E_{ij} je Lagrangeův deformační tenzor. Předpokládá se, že při nezatíženém stavu v elastickém chování je materiál izotropní a téměř nestlačitelný v objemu. Postup při měření napětí na vzorku elastomeru, nezávislý na výběru osy, je dán třemi deformačními invarianty, definovanými jako:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 - 3$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 - 1, \quad (15)$$

Kde symboly $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ udávají hlavní protažení.

Definice hlavního protažení: Procento protažené délky na protaženou délku hran malého objemového elementu v nezatíženém stavu:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L + \Delta u}{L_0}. \quad (16)$$

Hodnota λ_i je dána $(I + \varepsilon_i)$, kde ε_i je poměrná deformace. Při nezatíženém stavu je hodnota I_i nulová, když $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = I$. Hodnota I_3 je pro nestlačený materiál nulová, proto zůstávají pouze dvě nezávislé hodnoty napěťových konstant, I_1, I_2 , z čehož plyne rovnice deformačního potenciálu $W = W(I_1, I_2)$. [7]

2.2 Obecný vztah mezi napětí a deformací

Vztah mezi napětím a deformací získáme z funkce napěťového energetického potenciálu [7], vyjádřením “virtuální” práce, uvažované jako:

$$\delta W = (\sigma_1/\lambda_1) \cdot (\partial W/\partial \lambda_1) \delta \lambda_1 \quad (17)$$

Stejně lze vyjádřit vztah pro λ_2, λ_3 . Pro σ_1 obdržíme:

$$\sigma_1 = 2 \left[\lambda_1^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] + P \quad (18)$$

Stejným způsobem tak vyjádříme σ_2 a σ_3 , kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ jsou jednotlivé složky skutečného napětí. Hodnota P určuje nespecifikovaný tlak. P se stanovuje na základě známých hodnot σ a λ . [6, 7]

2.3 Jednoosá napjatost

Při jednoosé napjatosti zatěžujeme vzorek jen v jednom směru a konstantní rychlostí. Pro určení charakteristik zkušební tělesa se odečítají zatěžovací síly a prodloužení vzorku. Zkouška se ukončí v momentě přetržení vzorku.

Prodloužení je definováno poměrným protažením $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$ (Obr. 1.). Tato definice plyne z předpokladu nestlačitelnosti, kdy se objem nemění a proto $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = I$.

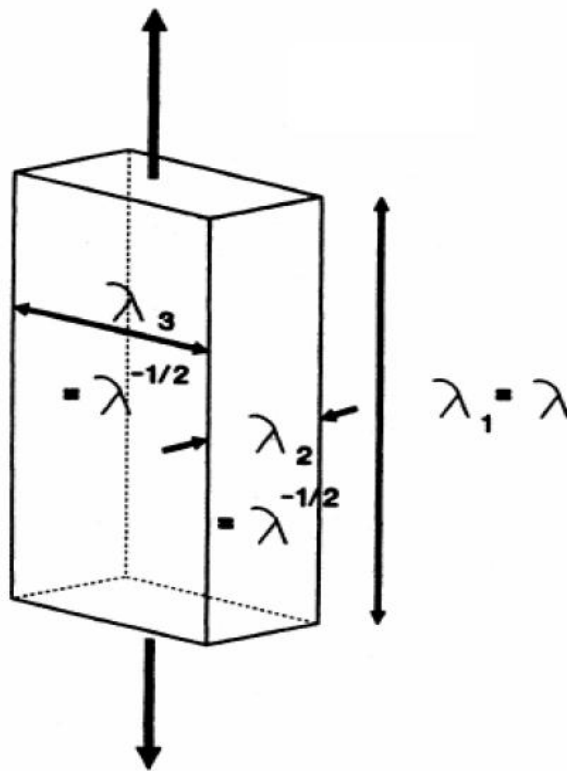
Ve stavu, kde jsou boční strany nezátíženy, platí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a rovnice (18.) pro σ_2 a σ_3 se stane rovnicí neznámého stlačení P:

$$P = -2 \left[\lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (19)$$

Při dosažení rovnice do vztahu (18.) pro $\sigma_1 (= \sigma)$ výsledek je:

$$\sigma = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-1}), \quad (20)$$

Kde σ udává skutečné napětí. [7]



Obr. 1: Jednoosá napjatost

2.4 Dvouosá napjatost

Zkoušky dvouosé napjatosti se provádějí na trhacím stroji při rovnoměrném zatížení vzorku ve dvou směrech, současně se zaznamenává velikost zatěžovací síly a protažení vzorku. Vzorek má tvar čtverce, případně kotouče. Upíná se po celém obvodu do trhacího stroje.

Další metoda spočívá v nafukování, kdy je působícím tlakem fragment plochy namáhán rovněž dvouosým tahem.

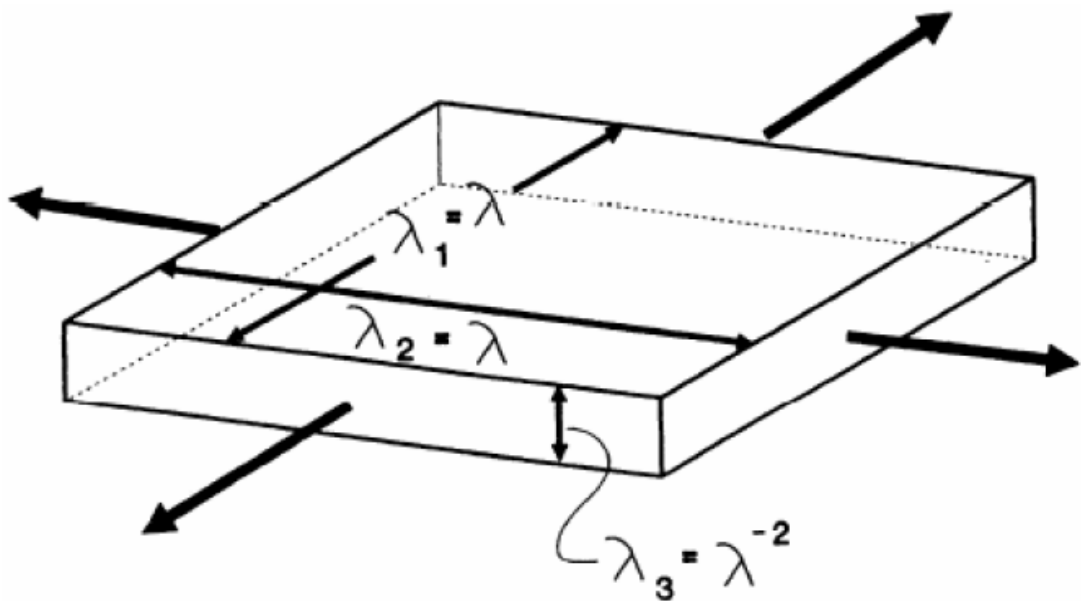
Ze vztahů pro jednoosou napjatost získáme vztah pro napjatost dvouosou. Poměrné protažení je dáno jako $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$; $\lambda_3 = 1/\lambda^2$ (Obr. 2.). Napětí σ_3 je nulové, protože na této straně je vzorek nezatížen. Poté P v rovnici (18.) přechází na:

$$P = -2(\lambda^{-4}W_1 - \lambda^4W_2). \quad (21)$$

Napětí σ_2 a σ_1 jsou dány jako:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2)(\lambda^2 - \lambda^{-4}). \quad (22)$$

Z toho plyne, že vztah mezi napětím a deformací je vysoce nelineární. [7]



Obr. 2: Dvouosá napjatost

2.5 Čistý smyk

Zkouška pro čistý smyk spočívá v zatěžování vzorku obdélníkového tvaru v hlavním směru způsobem, kdy nedojde k zmenšení šířky vedlejších stran. K tomu slouží dlouhé horizontální svorky.

Tento deformační stav je definován jako napětí aplikované ve směru 1, v takové formě, že je zabráněno změně šířky ve směru 2, tzn. $\lambda_2 = 1$ (Obr. 3.). Odtud je označení smyk.

Při čistém smyku během deformace hlavní osy nerotují. Ve směru namáhání vzorku je výška h mnohem menší, než šířka w kolmá na směr hlavního namáhání a to zhruba o jednu desetinu w . Dlouhé horizontální vzorky neumožňují změnu délky vedlejších stran vzorku a napětí tak působí jen ve vertikálním směru, takže je dáno $\lambda_2 = 1$.

Při deformaci je poměrné prodloužení definováno jako $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 1$ a $\lambda_3 = 1/\lambda$, zatímco napětí $\sigma_3 = 0$. Napětí σ_2 je vyvoláno svorkami, takže není nulové. Z rovnice (18.) vyplývá:

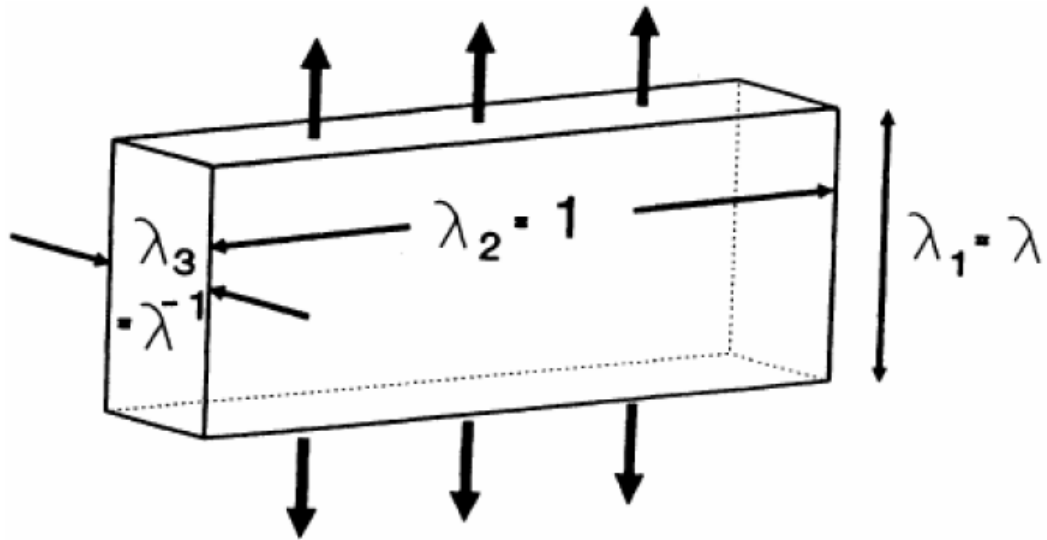
$$P = -2(\lambda^{-2}W_1 - \lambda^2W_2) \quad (23)$$

Takže napětí $\sigma_1 (= \sigma)$ ve směru protahování je dáno jako:

$$\sigma = -2(W_1 + W_2)(\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (24)$$

A vedlejší napětí σ_2 je:

$$\sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2)(1 - \lambda^{-2}) \quad (25)$$



Obr. 3: Čistý smyk

2.6 Přehled hyperelastických modelů

Různé hyperelastické modely se rozlišují definicí funkce hustoty deformační energie W . Dále jsou uvedeny nejpoužívanější tvary funkce W , které dostaly svůj název po svých autorech.

2.6.1 Polynomická forma

Polynomická funkce je založena na prvním a druhém invariantu deformace (I_I , I_{II}). Vyjadřuje se ve formě:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

Kde c_{ij} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale zpravidla není hodnota N vyšší než 3. Tuto metodu můžeme použít pro deformace dosahující až 300%. [2,6]

2.6.2 Neo-Hookean

Tento model patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Je brán jako podmnožina polynomické formy $N = 1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$. Model není schopen přesně vystihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Při smykové deformaci vykazuje lineární chování.

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) \quad (2)$$

Kde μ je počáteční smykový modul:

$$\mu = nkT \quad (3)$$

kde n je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu,

k je Boltzmanova konstanta,

T je absolutní teplota.

Tento model se používá pro deformaci do 40% v jednoosém namáhání. [2,7]

2.6.3 Yeoh

Tento model je podobný polynomické formě, ale používá druhého deformačního invariantu. Obtížněji se vyhodnocuje a jeho výsledky nejsou přesné. Výhodou toho modelu je jeho jednoduchost. Definice:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (4)$$

Kde c_{i0} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna. Hodnota N obvykle není vyšší než 3. Pokud je $N = 1$ jde o Neo-Hookean model.

Yeoh model je uvažován s $N = 3$. Tří parametrový model Yeoh poskytuje dobré deformace velkého rozsahu i když pro nižší hodnoty deformace nemusí být přesný. [2,6]

2.6.4 Mooney-Rivlin

Jde o speciální případy polynomické formy. Používají se dvou, tři, pěti a devíti parametrové Mooney-Rivlin modely.

Model o dvou parametrech je nejpoužívanější. Je podobný polynomické formě s $N=1$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

Kde c_{10} , c_{01} jsou materiálové konstanty.

Model o třech parametrech je totožný s polynomickou formou $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (6)$$

Kde c_{10} , c_{01} , c_{11} jsou materiálové konstanty.

Model o pěti parametrech je totožný s polynomickou formou $N = 2$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (7)$$

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (8)$$

Kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} jsou materiálové konstanty.

Model o devíti parametrech je totožný s polynomickou formou pro $N=3$:

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \\ & + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \\ & + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \end{aligned} \quad (9)$$

Kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} , c_{03} jsou materiálové konstanty.

Dvouparametrový model je používán do 90-100% tahové deformace. Pěti nebo devítiparametrové modely se používají pro deformace do 300%. [2]

2.6.5 Arruda-Boyce

Tento model je založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Může být považován za rozšíření Yeoh modelu pro $N=5$, přičemž konstanty mají reálný význam.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (10)$$

Kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750}$$

Kde μ je počáteční smykový modul a λ_L je tzv. „limitní protažení“ sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, při kterém se síť dále neprotahuje a napětí se blíží k nekonečnu. Pokud se λ_L rovná nekonečnu, přechází forma Arruda-Boyce na Neo-Hookean. Model se používá pro deformace do 300%. [2,6]

2.6.6 Gent

Tento model je podobný složitějšímu Arruda-Boyce modelu, jelikož také užívá limitní síťové protažení, nevychází ale z modelu vnitřní struktury elastomerů.

$$W = -\frac{E I_m}{6} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (11)$$

Kde E je počáteční model pružnosti, který je pro nestlačený materiál 3μ . I_m znamená limitní hodnotu členu $(I_1 - 3)$. Pokud hodnota přirozeného logaritmu roste, výsledná forma se bude podobat Yeoh modelu. Pokud I_m se bude rovnat nekonečnu, model přejde na Neo-Hookean. Výhody modelu jsou v jeho jednoduchosti a schopnosti zasáhnout závěrečnou vyztužovací fázi napětíově deformační odezvy. [2]

2.6.7 Ogden

Tento model je dnes velmi široce používaný a zachycuje chování elastomerů i při velkých deformacích

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} + 3) \quad (12)$$

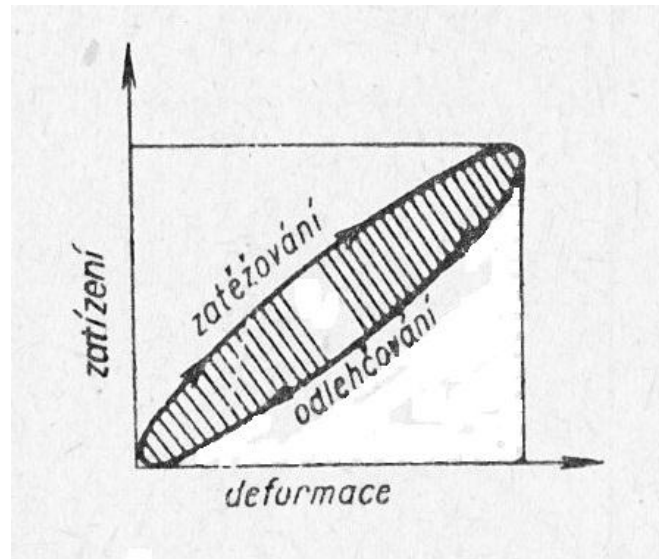
Kde μ_i , α_i jsou materiálové konstanty bez fyzikálního významu. Za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale málokdy je N vyšší než 3.

Pro $N = 1$; $\alpha_1 = 2$ a $\mu_1 = \mu$ se Ogden stává stejný jako model Neo-Hookean. Pro $N = 2$; $\alpha_2 = -2$ a $\mu_1 = 2c_{10}$ a $\mu_2 = 2c_{01}$ se Ogden mění na dvouparametrový Mooney-Rivlin model. Ogden se může použít pro deformaci do 700%. [2,6]

2.7 Dynamické namáhání

Při namáhání jakýmkoliv způsobem (tlakem, tahem, smykem) dodáváme energii. Zrušíme-li zatížení, nezískáme tuto energii plně zpět, určitá její část se již nevrátí, ale promění se v teplo. Elasticitou nazýváme schopnost pryže vracet část dodané energie ve formě mechanické energie. Tlumení je pochod, kdy se část dodané mechanické energie nevrací, ale přeměňuje na teplo.

Tlumení zjišťujeme takovou zkušební metodou, která nám umožní zaznamenat při dynamickém namáhání křivku zatížení – deformace. Příklad je na obrázku (Obr. 4).



Obr. 4: Křivka zatížení – deformace

Křivky pro zatěžování a odlehčování se nekryjí, nýbrž po ustálení děje vytvoří hysterezní smyčku. Plocha pod zatěžovací smyčkou je práce absorbovaná pryží při jejím zatěžování.

Plocha pod odlehčovací křivkou je práce vrácená při odlehčení pryže. Plocha mezi křivkami je „ztracená“ práce. Je to energie, která se proměnila v teplo.

Při dynamickém namáhání se v průběhu každého cyklu mění stejná část přivedené energie v teplo. To zapříčiňuje stoupaní teploty v pryžovém dílci, dokud nenastane tepelná rovnováha, tj. že se přivedená teplota z vnitřních ztrát vyrovná teplotě odvedené vedením nebo sáláním z povrchu pryžového členu. Nesmíme však zapomínat, že v důsledku nízké tepelné vodivosti je v pryžovém dílci velký teplotní spád. Znamená to, že při dynamickém namáhání pryže musíme dávat pozor na problémy související s výškou teploty. Růst teploty při střídavém namáhání vede k tepelným trhlinám uvnitř pryže. Modul tlumení a pružnosti se podstatně mění v závislosti na teplotě.

Modul pružnosti a tlumení velmi závisí na frekvenci. Vliv frekvence je podobný jako vliv teploty. I při normální běžné teplotě existuje frekvence, při níž nastává „mechanické zmrznutí“ pryže. V důsledku takové frekvence modul pružnosti stoupne, při normální provozní teplotě, na několikanásobek své hodnoty. Naštěstí u běžně používaných pryží leží tyto frekvence tak vysoko, že jen málokdy je nutno se jí zabývat. Bývá to obvykle u pryží se špatnou odolností proti nízkým teplotám.[9]

2.8 Vliv teploty na mechanické vlastnosti

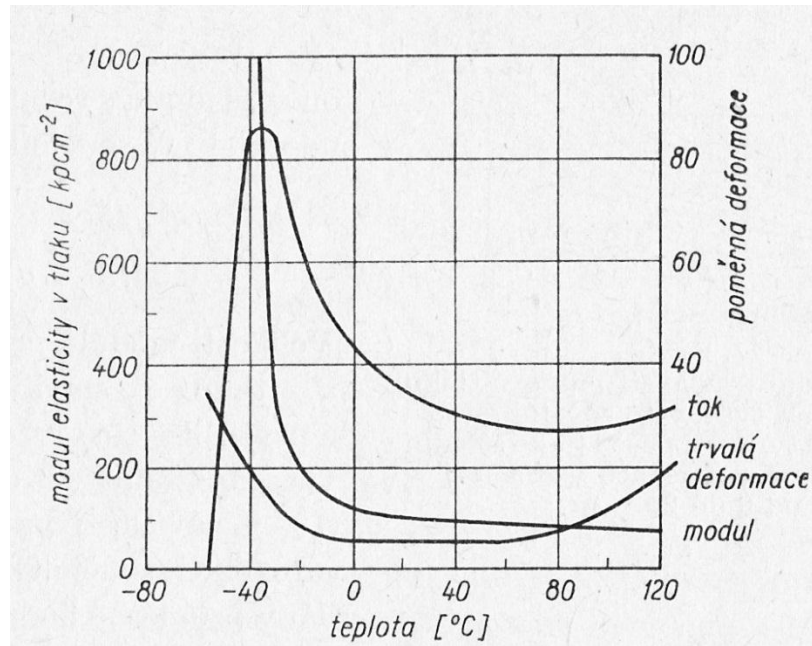
Vlastnosti pryže jsou ovlivňovány tvarem, teplotou, rychlostí změny velikosti vnějších sil a rozměry zkušebního tělesa. Vliv těchto podmínek se u pryží nestejného složení projevuje s různou intenzitou.

V praxi se napětí, kdy se dosáhne předem zvoleného prodloužení, nazývá modul v tahu. Pod pojmem poměrné napětí chápeme napětí, při kterém se dosáhne předem zvoleného prodloužení pracovní části zkušebního tělesa. Pokud se omezíme pouze na elastické deformace, užíváme i v gumárenství modulů, a to modulu pružnosti v tlaku, modulu pružnosti v tahu, modulu pružnosti v ohybu, modulu pružnosti ve smyku. Přitom se často atribut „pružnosti“ vypouští a jedná se pak o modul v tlaku a o modul ve smyku.

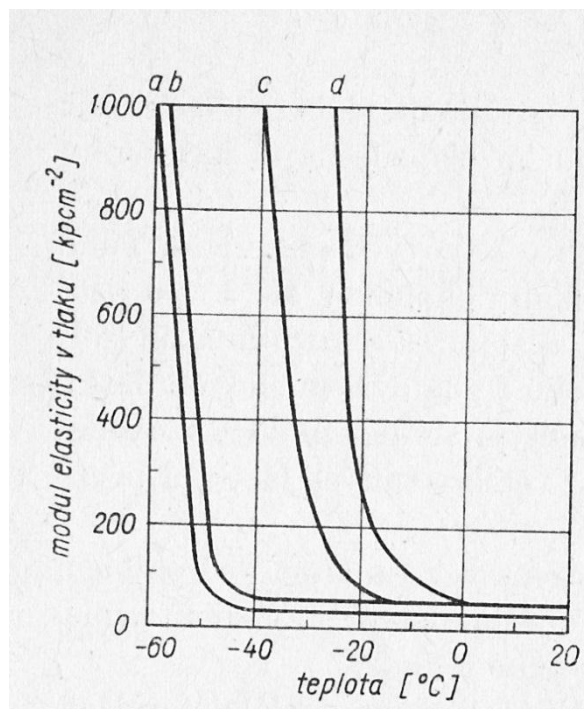
Pro moduly pružnosti platí úměrnost, že napětí je úměrné deformaci, kdy konstantou úměrnosti je modul elasticity. Velikost modulu elasticity v tlaku závisí na různých faktorech. Obr. 5 ukazuje, že charakter závislosti tohoto modulu na teplotě je pro různé druhy kaučuku stejný, pouze křivka je jako celek posunuta ve směru teplotní osy. Na obrázku 6 je znázorněn vliv teploty u téhož elastomeru na modul elasticity v tlaku, na velikost toku a na velikost trvalé deformace. Při teplotě $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ nastává skokový stav. Hodnota modulu je velmi vysoká, velikost toku je malá. Křivka toku prochází maximem. Maximum leží v oblasti teplot, při kterých nastává skokový stav. V oblasti teplot běžného použití prochází křivka toku minimem, při vyšších teplotách opět značně stoupá.

U kaučukových směsí lze volbou elastomeru a vhodnou skladbou směsi tuto křivku posunout jako celek ve směru osy teplot a do jisté míry i ve směru kolmém na osu teplot.

Modul elasticity zjištěný na dílci z různých pryží namáhaných tlakem není materiálovou konstantou, protože je kromě závislosti na teplotě silně závislý i na tvaru dílce. Přitom musí být splněna důležitá podmínka, aby při tlakovém namáhání měl pryžový dílec možnost deformace do stran. Není-li tato podmínka splněna, jde o pryžový dílec prostorově uzavřený bez možnosti deformace do stran. Pak zjišťujeme modul objemové pružnosti.[9]



Obr. 5: Vliv teploty ba velikost modulu pružnosti v tlaku, na velikost trvalé deformace



Obr. 6: Velikost modulu pružnosti v tlaku v závislosti na teplotě pro přírodní kaučuk

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍL PRÁCE

Cílem práce je posoudit vliv teploty na mechanické chování různých elastomerů používaných pro výrobu pneumatik. Tento vliv byl zkoumán při zatížení elastomerů jednoosým tahem.

4 POSTUP PRÁCE

4.1 Materiály

Jako zkušební materiál bylo použito 11 druhů vulkanizovaných kaučukových směsí pro výrobu pneumatik.

Směsi byly o různém složení. Následně byly vysekány vzorky ve tvaru oboustranných lopatek a to ve dvou směrech. Ve směru tažení materiálu a ve směru příčném na směr tažení materiálu. Směsi byl označen dle směru pomocí šipek a písmeny, které odpovídaly druhu materiálu.

4.1.1 Seznam druhů směsí a jejich složení

Směsi byl označen písmeny C, D, E, F, G, H, I, K, L, O, S

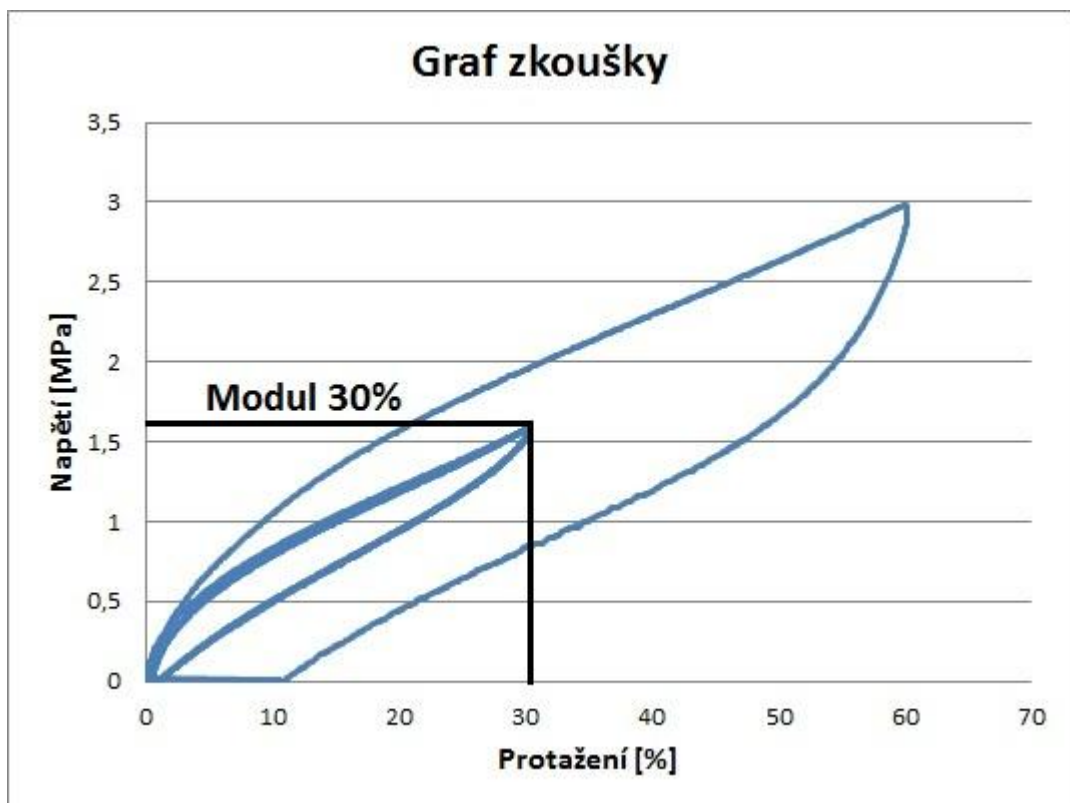
Složení jednotlivých směsí:

Směs	Saze	Kaučuk
C	64 dsk	NR, BR, SBR
D	60 dsk	NR
E	56 dsk	NR
F	26 dsk	NR
G	54 dsk	NR, BR
H	50 dsk	NR, BR, SBR
I	54 dsk	NR, BR, SBR
K	65 dsk	NR, BR
L	84 dsk	NR, SBR
O	neznámé	BIIR, CIIR
S	66 dsk	NR, BR, SBR

4.2 Testování materiálu

4.2.1 Podstata zkoušky

Zatěžovací tahová zkouška byla prováděna dle normy ČSN ISO 37 na trhacím stroji ZWICK. Zkušební materiál, ve tvaru oboustranných lopatek, byl upnut v čelistích a cyklicky namáhána za různých teplot. Počet cyklů bylo 6. První natažení bylo do 60% délky zkušebního materiálu, následné vrácení do původní polohy a poté se začal materiál cyklicky namáhat do 30% své délky v 5 cyklech. Měření se provádělo za různé teploty. Počet teplot, při kterých se měření provádělo, bylo 4. První měření bylo při pokojové teplotě a to 24°C, následně byla k trhacímu stroji přimontována teplotní komora za účelem vyhřátí materiálu na vyšší teplotu a následné jeho měření. Následující měření probíhalo při teplotách 38°C, 70°C, 100°C. Měření u všech druhů směsí bylo prováděno ve dvou směrech. Ve směru kolmém a příčném dle směru tažení materiálu. Při měření se odečítaly hodnoty síly a prodloužení, potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik protahovaných zkušebních těles v průběhu 5 cyklů.

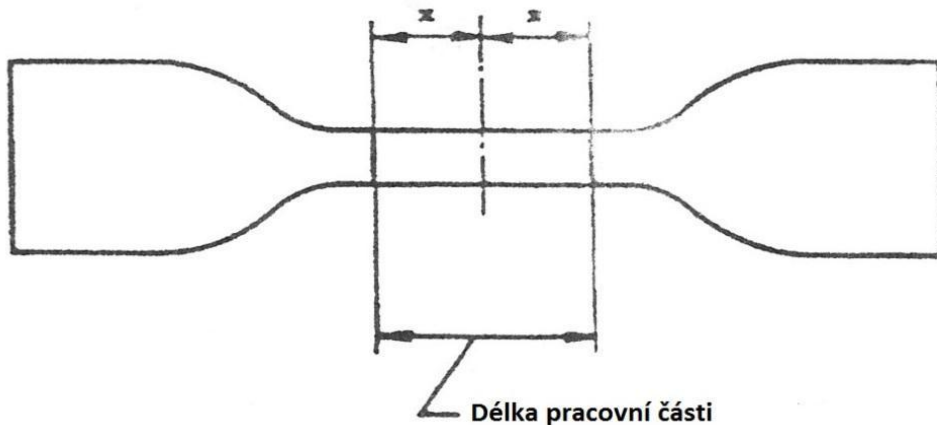


Obr. 7: Modul 30%

4.2.2 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa byla ve tvaru oboustranných lopatek. (Obr. 4) Tělesa různé směsi byla vystřižena ve dvou směrech, podélném a příčném.

Standartní tloušťka zúžené části byla 2 mm a délka pracovní části byla 20 mm. Ostatní rozměry byly dány sekacím nožem. Rozměry sekacího nože byly typu 4. (Tab. 1)



Obr. 8: Tvar oboustranných lopatek

4.2.3 Zkušební zařízení

4.2.3.1 Vysekávací a vyřezávací nože

Veškeré vysekávací a vyřezávací nože musejí odpovídat ISO 4661-1. [8] Rozměry vysekávacího nože pro tělesa tvaru oboustranných lopatek určeny z tabulek normy ČSN ISO 37. Z tabulek byl určen vysekávací nůž typu 4. (Tab. 1)

Tab. 1: Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek

Rozměr	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A Celková délka (minimální) ¹⁾	115	75	50	35
B Šířka lopatek	25,0 ± 1,0	12,5 ± 1,0	8,5 ± 0,5	6,0 ± 0,5
C Délka zúžené části	33,0 ± 2,0	25,0 ± 1,0	16,0 ± 1,0	12,0 ± 0,5
D Šířka zúžené části	6,0 +0,4	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,0 ± 0,1
E Přechodový poloměr vnější	14,0 ± 1,0	8,0 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3,0 ± 0,1
F Přechodový poloměr vnitřní	25,0 ± 2,0	12,5 ± 1,0	10,0 ± 0,5	3,0 ± 0,1
¹⁾ Vnější celková délka může být nutná pro zajištění, aby do kontaktu s čelistmi stroje přicházely jenom rovnoběžné části rozšířených konců, což zabraňuje trhání zkušebních těles v rozšiřujících částech				

4.2.3.2 *Tloušťkoměr*

Přístroj pro měření tloušťky zkušebních těles tvaru oboustranných lopatek. Musí odpovídat požadavkům metody A v ISO 4648:1991.[8]

4.2.3.3 *Trhací stroj*

Trhací stroj musí splňovat požadavky ISO 5893:1993; v přesnosti měřené síly musí odpovídat pro oboustranné lopatky stupni E. Pro zkoušení při jiné než standardní laboratorní teplotě, musí mít stroj vhodnou temperační komorou. Postup pro získání vyšších nebo nižších teplot je uveden v ISO 3383.[8]

4.2.3.4 *Počet zkušebních těles*

Zkušebních těles jednotlivé směsi bylo pět v podélném směru a pět v příčném směru.

4.2.4 Postup zkoušky

Zkušební těleso bylo vloženo do trhacího stroje tak, aby byl symetricky upnut a aby byl tah rovnoměrně rozložen na příčný průřez tělesa. Následně byl připojen na těleso mechanismus průtahoměru. Spustil se chod stroje a následně se zaznamenávají změny pracovní délky zkušebního tělesa a síly po celou dobu zkoušky s přesností $\pm 2\%$ jak je požadováno pro účely vyhodnocení.[8]

Zatěžování bylo prováděno v 6 cyklech. První cyklus byl do délky 60% protažení materiálu, poté následovalo 5 cyklu do 30% protažení material. Výsledné hodnoty byly brány z posledního cyklu.

4.2.5 Zkušební teplota

Teplota měření byla stanovena v různých stupních a to při 24°C, 38°C, 70°C a 100°C.

Vyhřívána byla jak temperační komora tak i samotný materiál, aby se dosáhlo co nejpřesnějšího měření pro danou teplotu.

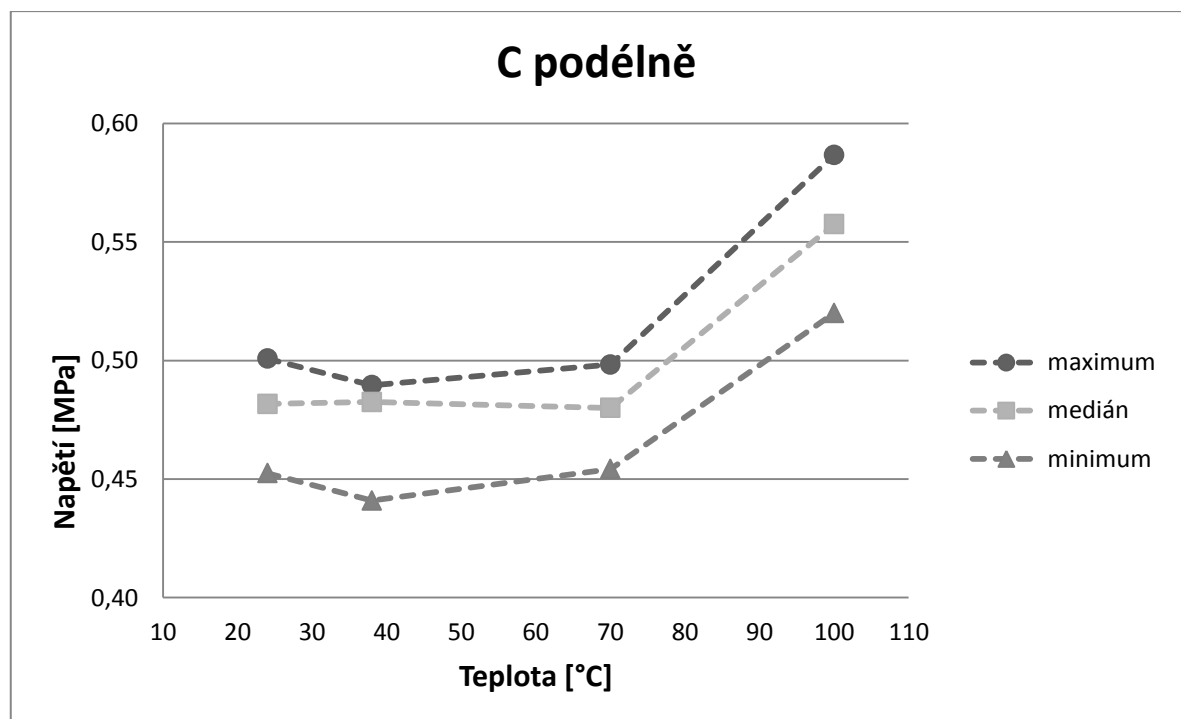
Po celou dobu jedné zkoušky byla při měření použita stejná teplota.

5 VÝSLEDKY ZKOUŠKY

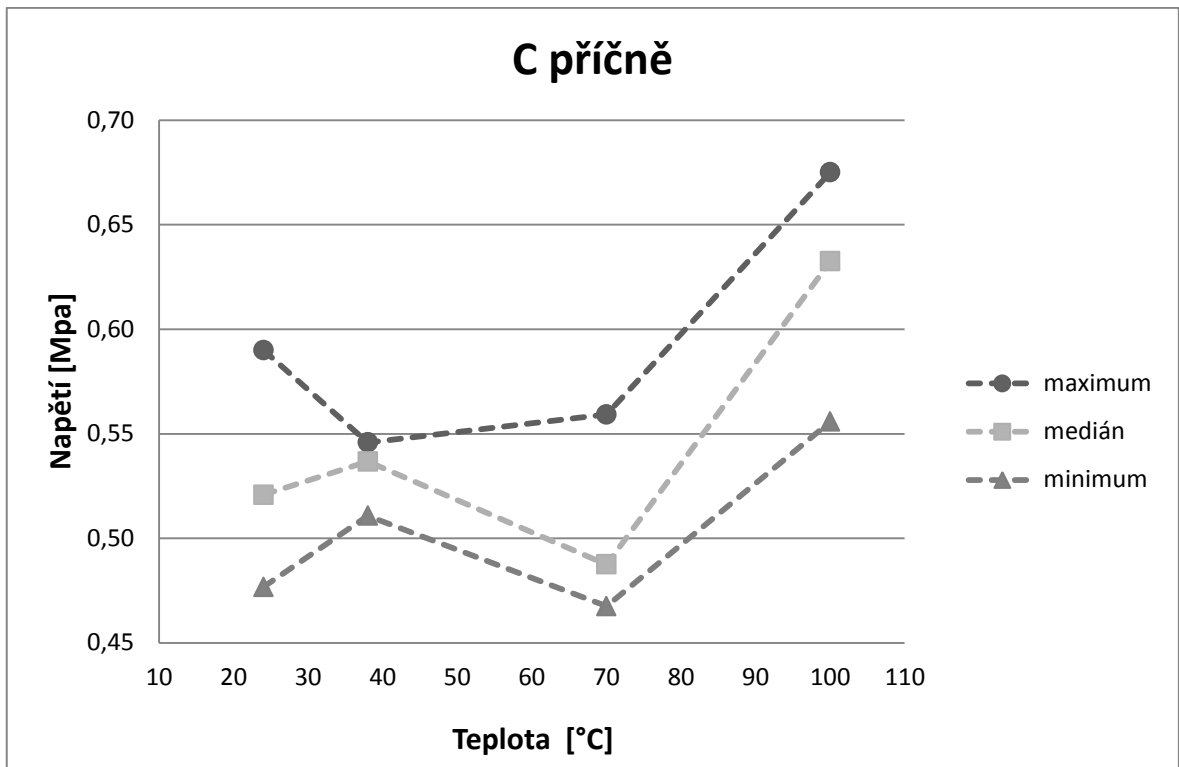
5.1 Materiál C

Tab. 2: Naměřené napětí pro materiál C

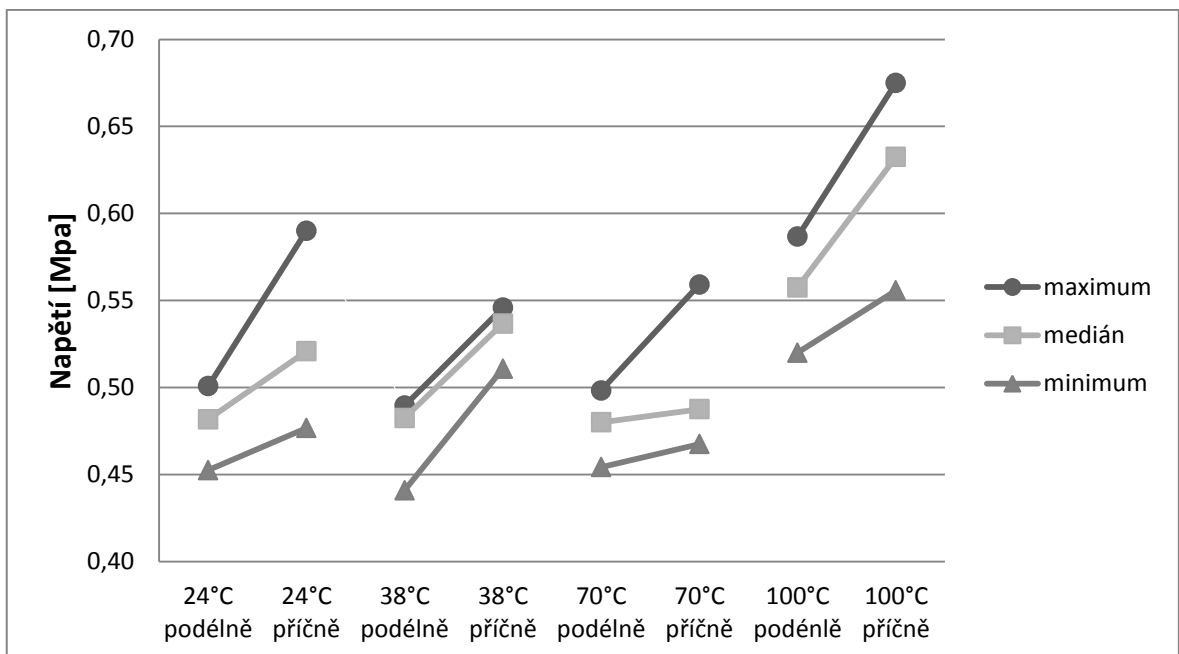
C		podélně	příčně
24°C	maximum	0,5008	0,5900
	medián	0,4817	0,5208
	minimum	0,4525	0,4767
38°C	maximum	0,4896	0,5458
	medián	0,4825	0,5367
	minimum	0,4409	0,5108
70°C	maximum	0,4983	0,5592
	medián	0,4800	0,4875
	minimum	0,4542	0,4675
100°C	maximum	0,5867	0,6750
	medián	0,5575	0,6325
	minimum	0,5200	0,5558



Obr. 9: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál C



Obr. 10: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál C

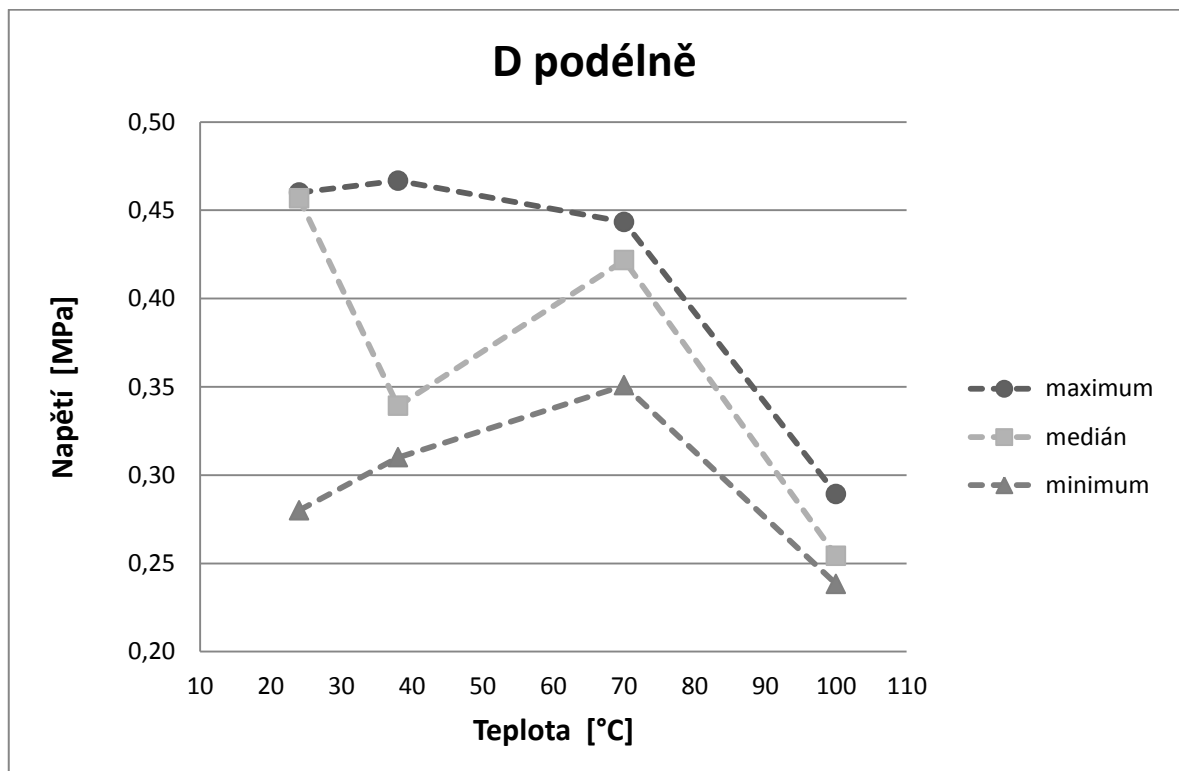


Obr. 11: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu C

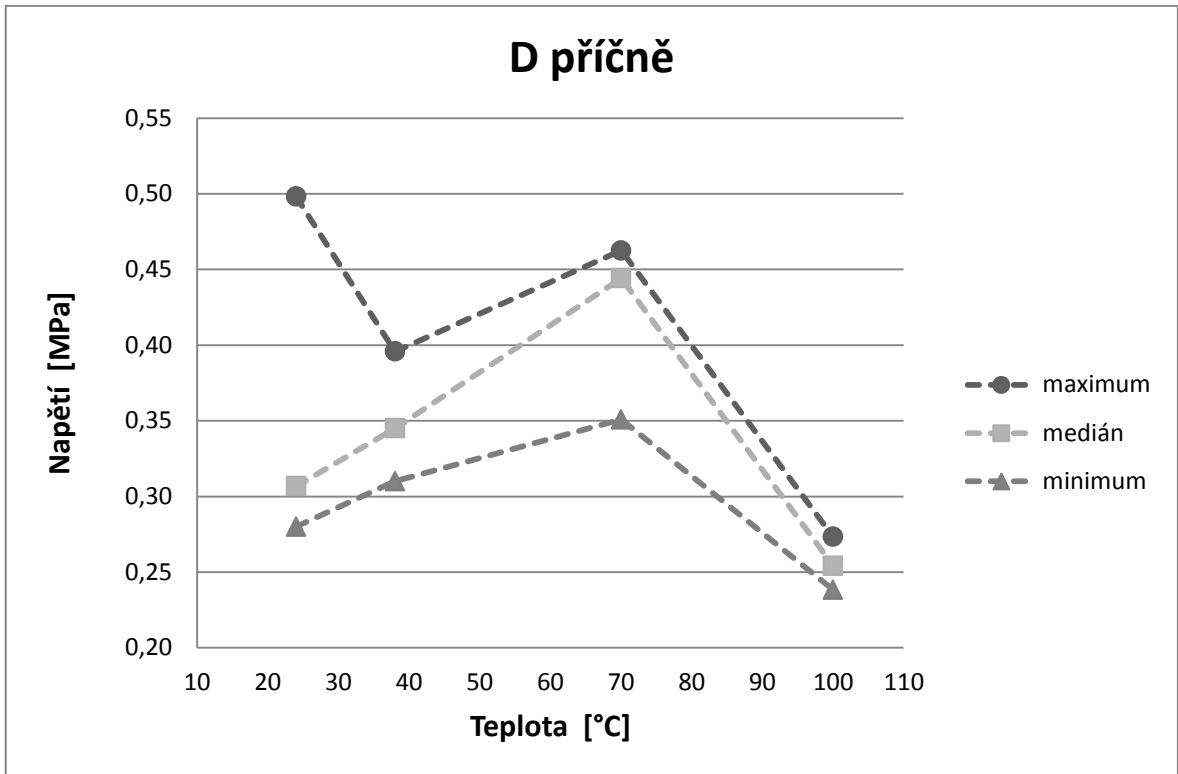
5.2 Materiál D

Tab. 3: Naměřené napětí pro materiál D

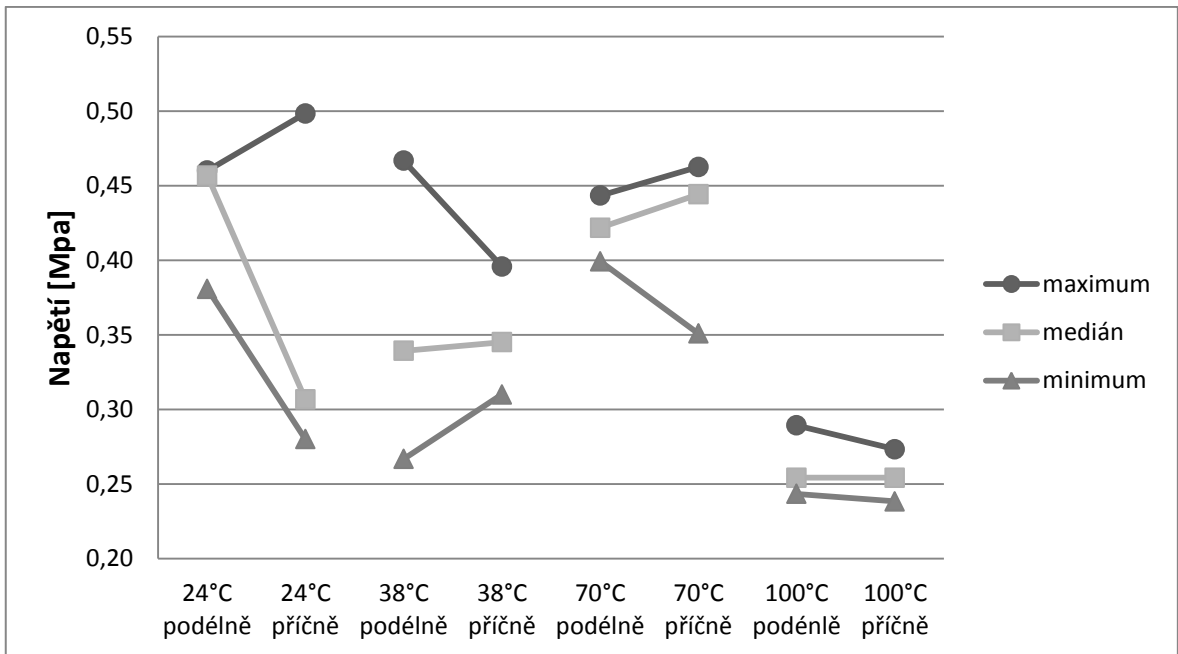
D		podélně	příčně
24°C	maximum	0,4600	0,4983
	medián	0,4567	0,3067
	minimum	0,3808	0,2800
38°C	maximum	0,4667	0,3958
	medián	0,3392	0,3450
	minimum	0,2667	0,3100
70°C	maximum	0,4433	0,4625
	medián	0,4217	0,4442
	minimum	0,3992	0,3508
100°C	maximum	0,2892	0,2733
	medián	0,2542	0,2542
	minimum	0,2433	0,2383



Obr. 12: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál D



Obr. 13: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál D

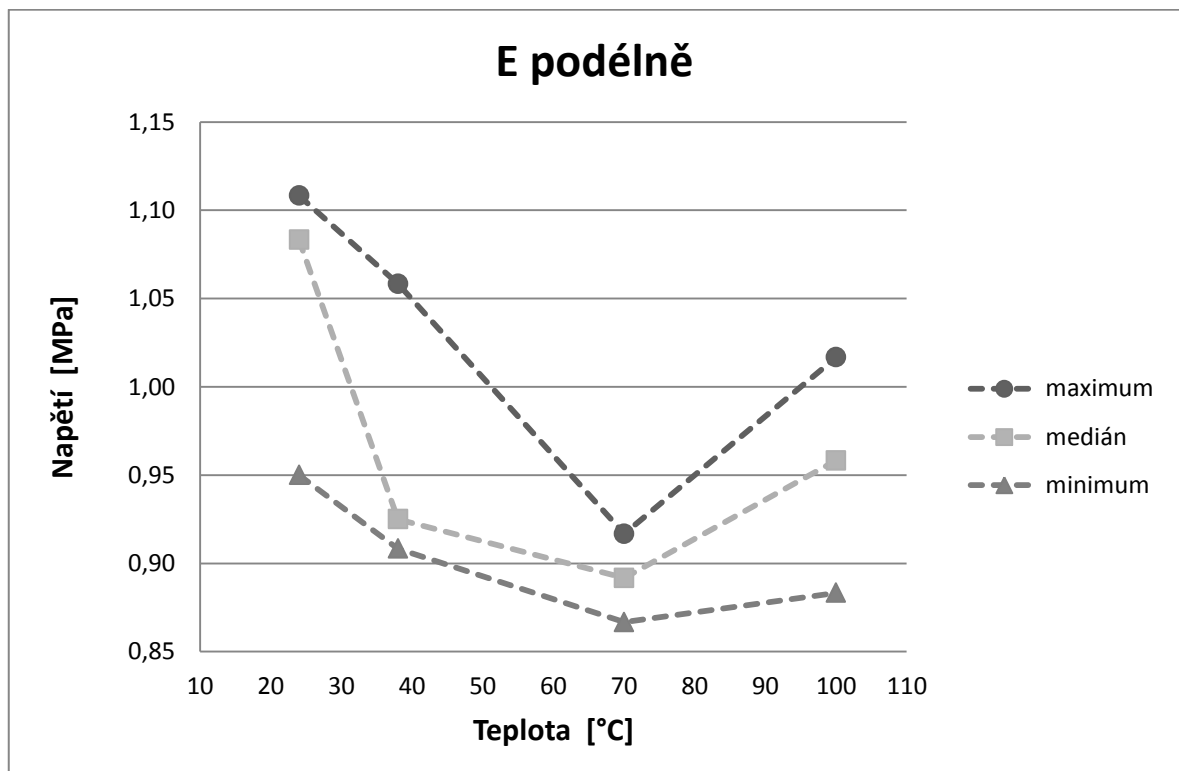


Obr. 14: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu D

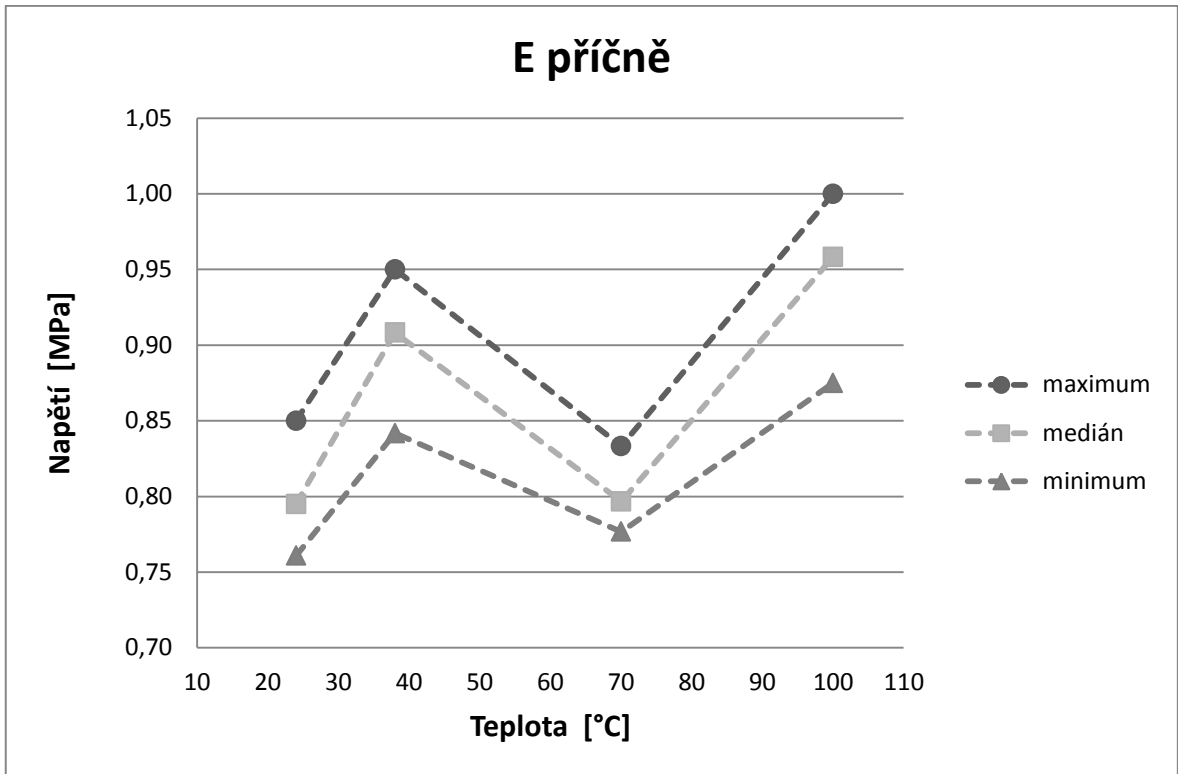
5.3 Materiál E

Tab. 4: Naměřené napětí pro materiál E

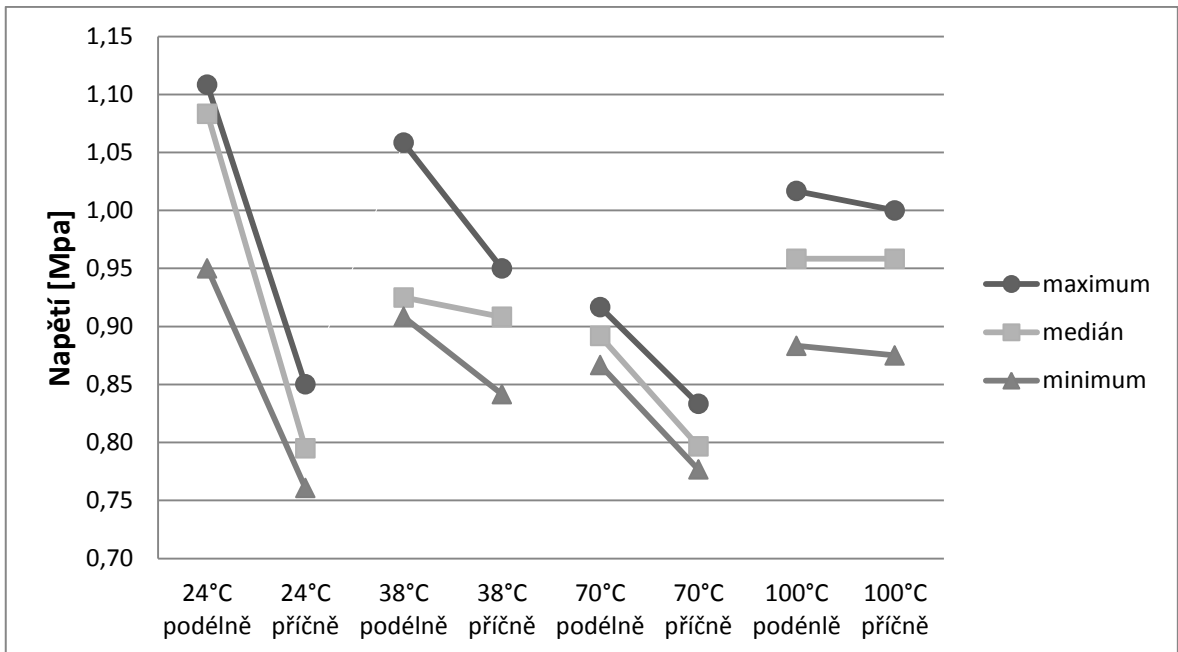
E		podélně	příčně
24°C	maximum	1,1083	0,8500
	medián	1,0833	0,7950
	minimum	0,9500	0,7608
38°C	maximum	1,0583	0,9500
	medián	0,9250	0,9083
	minimum	0,9083	0,8417
70°C	maximum	0,9167	0,8333
	medián	0,8917	0,7967
	minimum	0,8667	0,7767
100°C	maximum	1,0167	1,0000
	medián	0,9583	0,9583
	minimum	0,8833	0,8750



Obr. 15: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál E



Obr. 16: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál E

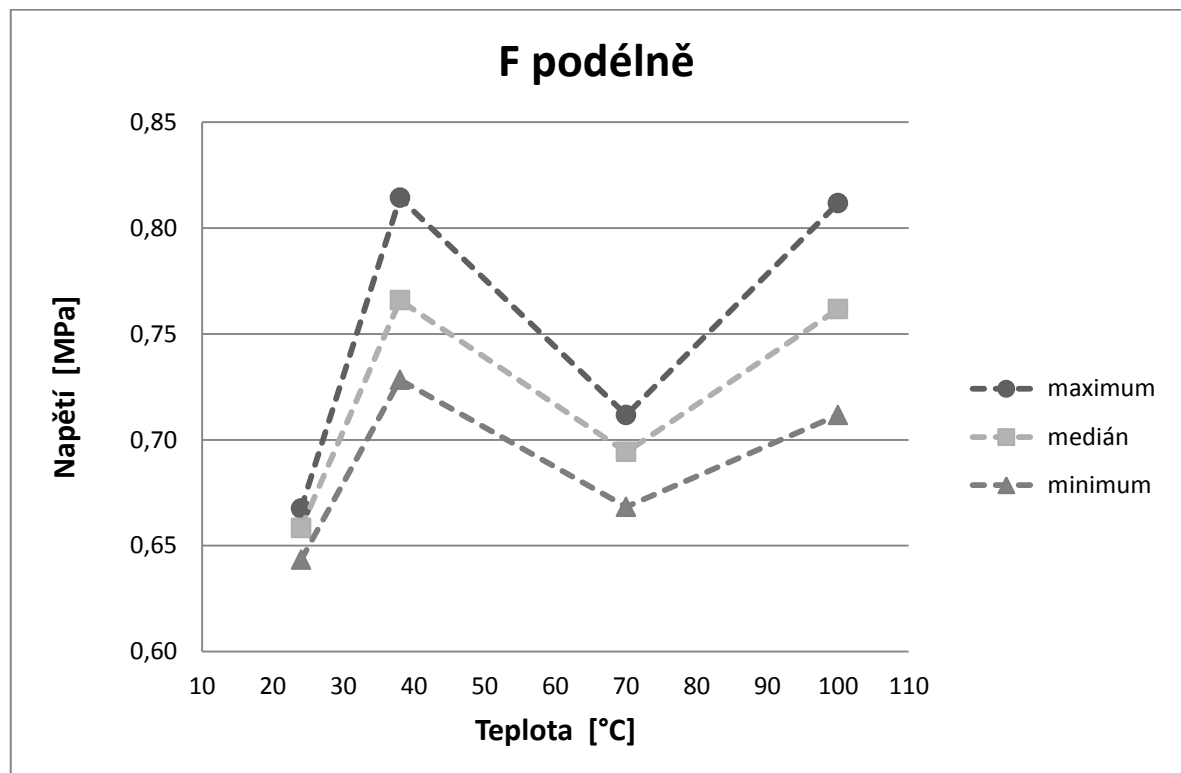


Obr. 17: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu E

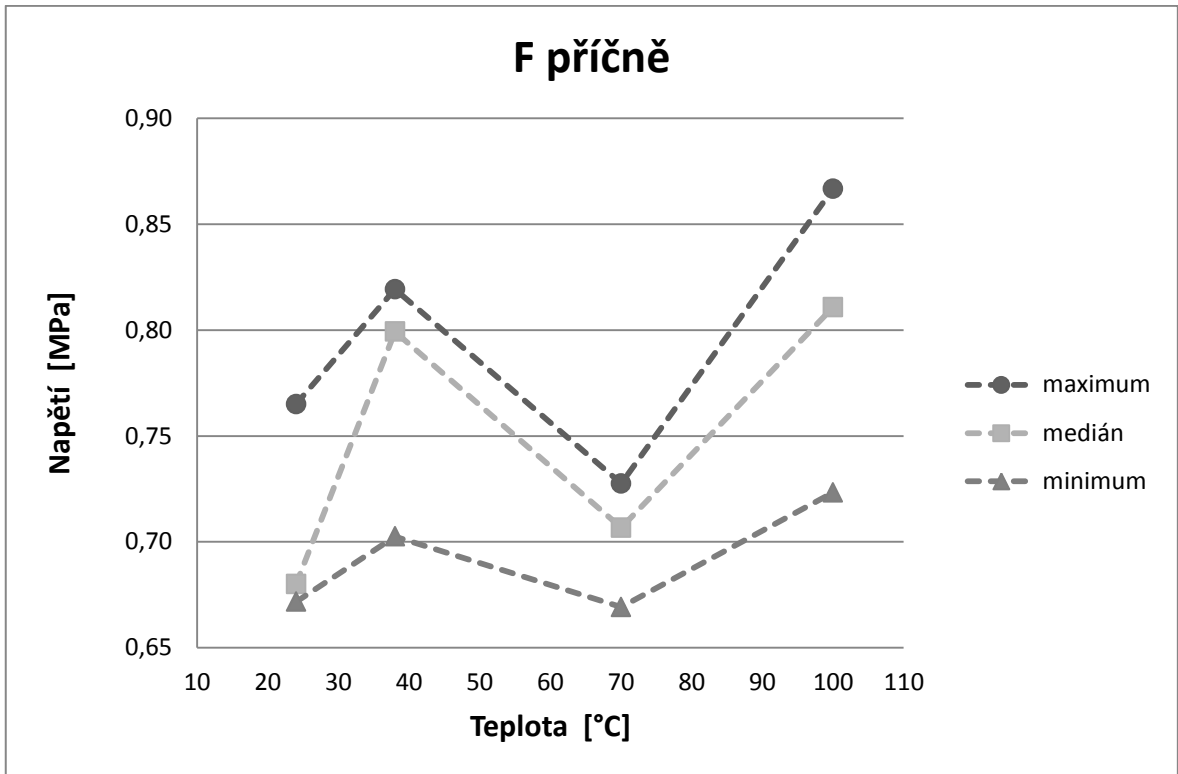
5.4 Materiál F

Tab. 5: Naměřené napětí pro materiál F

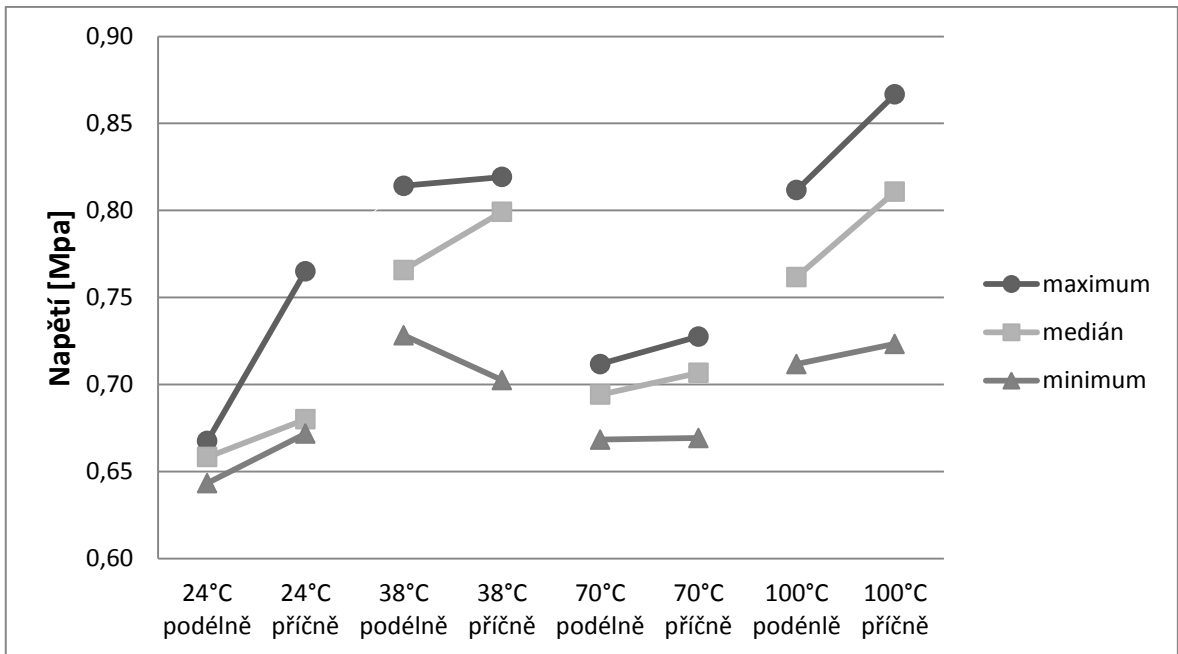
F		podélně	příčně
24°C	maximum	0,6675	0,7650
	medián	0,6583	0,6800
	minimum	0,6433	0,6717
38°C	maximum	0,8142	0,8192
	medián	0,7658	0,7992
	minimum	0,7283	0,7025
70°C	maximum	0,7117	0,7275
	medián	0,6942	0,7067
	minimum	0,6683	0,6692
100°C	maximum	0,8117	0,8667
	medián	0,7617	0,8108
	minimum	0,7117	0,7233



Obr. 18: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál F



Obr. 19: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál F

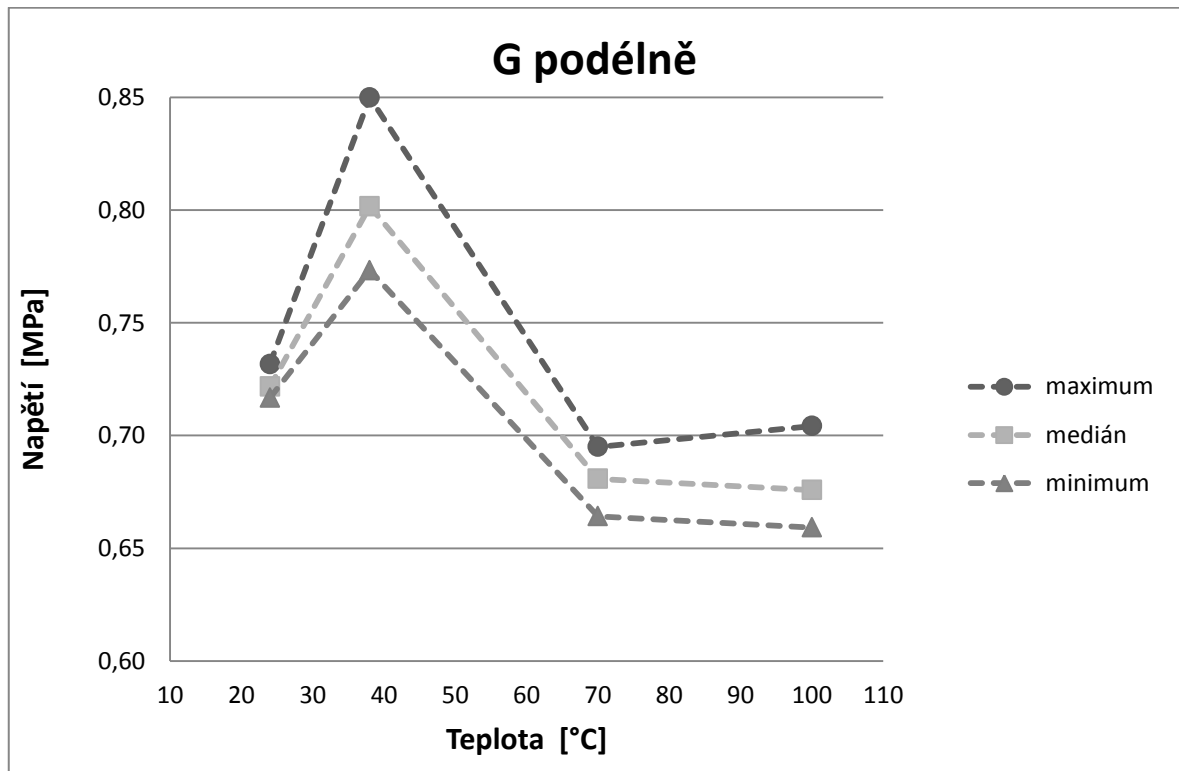


Obr. 20: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu F

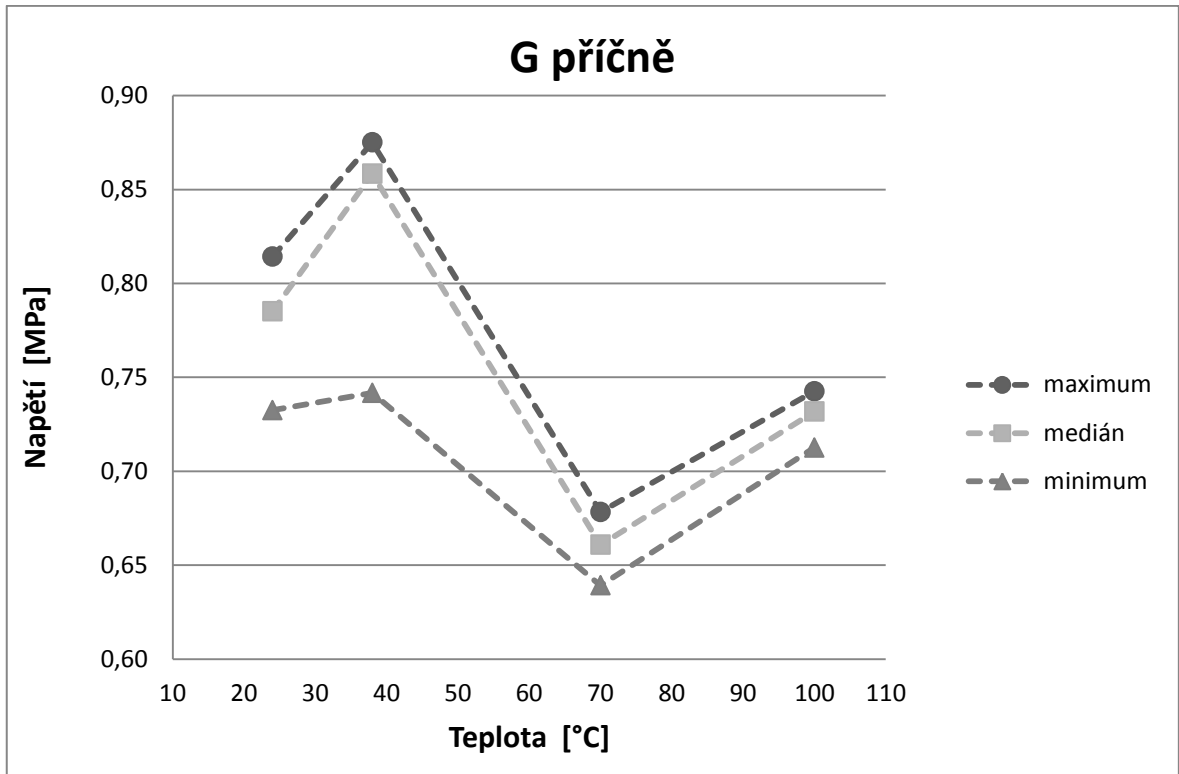
5.5 Materiál G

Tab. 6: Naměřené napětí pro materiál G

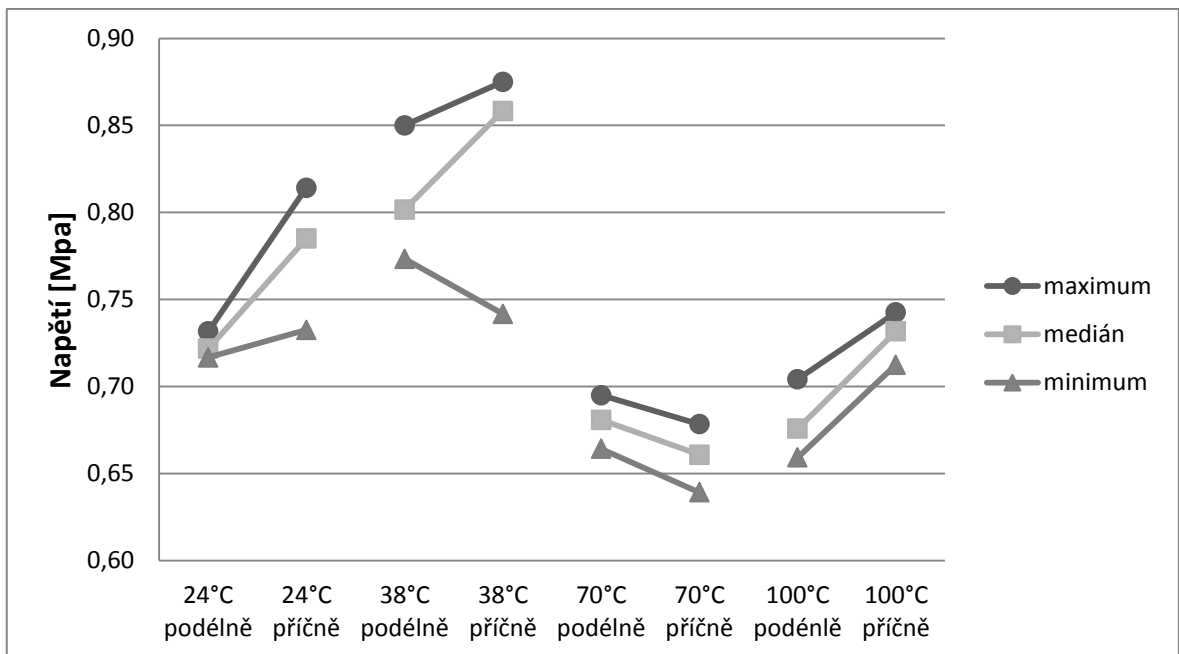
G		podélně	příčně
24°C	maximum	0,7317	0,8142
	medián	0,7217	0,7850
	minimum	0,7167	0,7325
38°C	maximum	0,8500	0,8750
	medián	0,8017	0,8583
	minimum	0,7733	0,7417
70°C	maximum	0,6950	0,6783
	medián	0,6808	0,6608
	minimum	0,6642	0,6392
100°C	maximum	0,7042	0,7425
	medián	0,6758	0,7317
	minimum	0,6592	0,7125



Obr. 21: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál G



Obr. 22: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál G

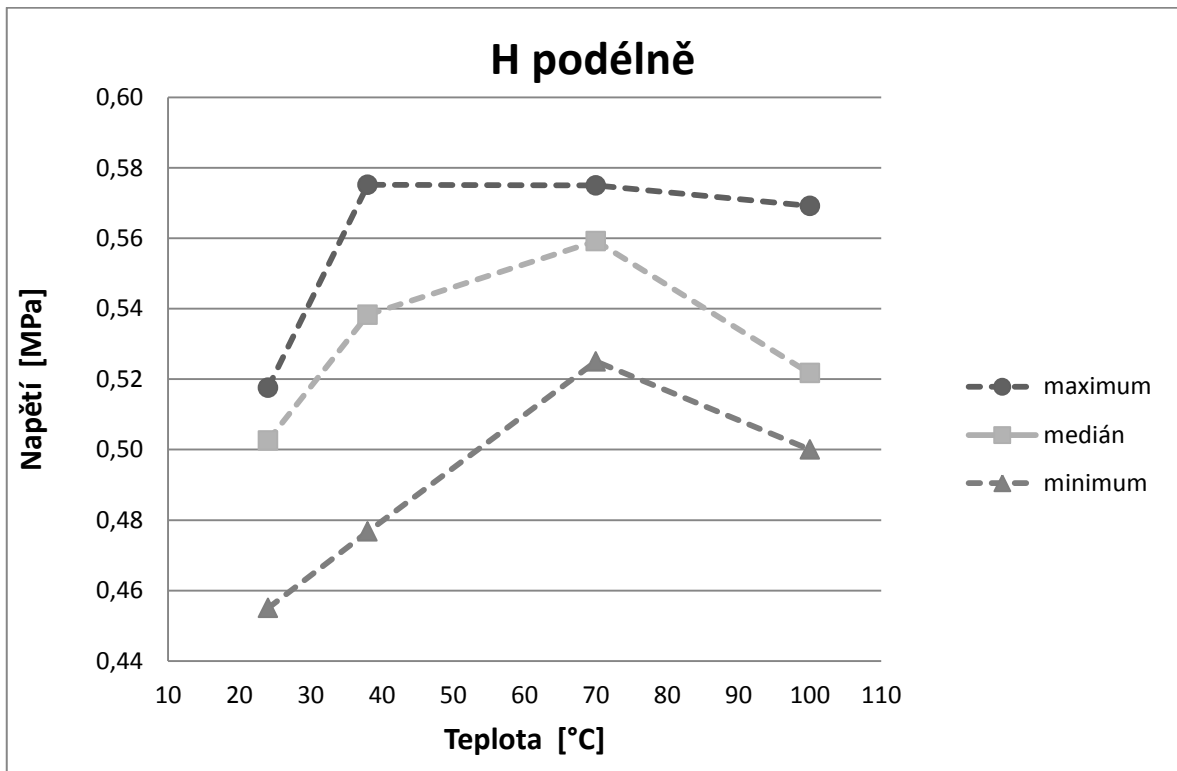


Obr. 23: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu

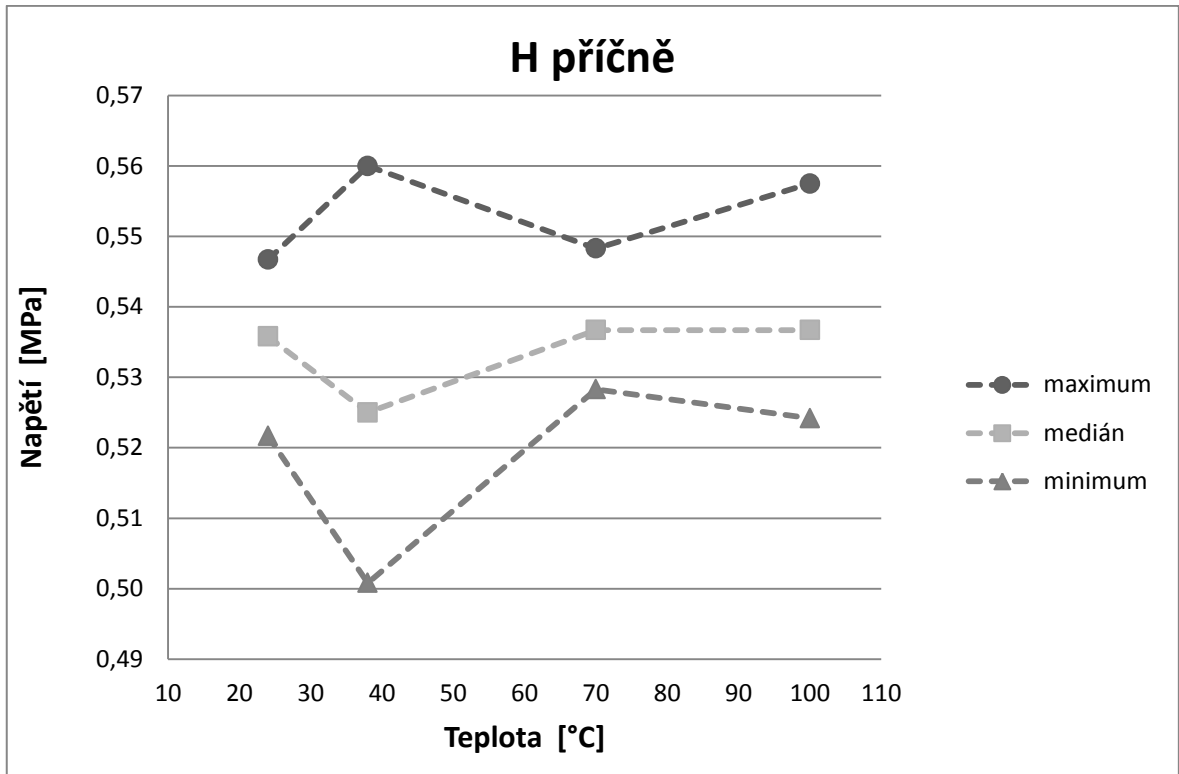
5.6 Materiál H

Tab. 7: Naměřené napětí pro materiál H

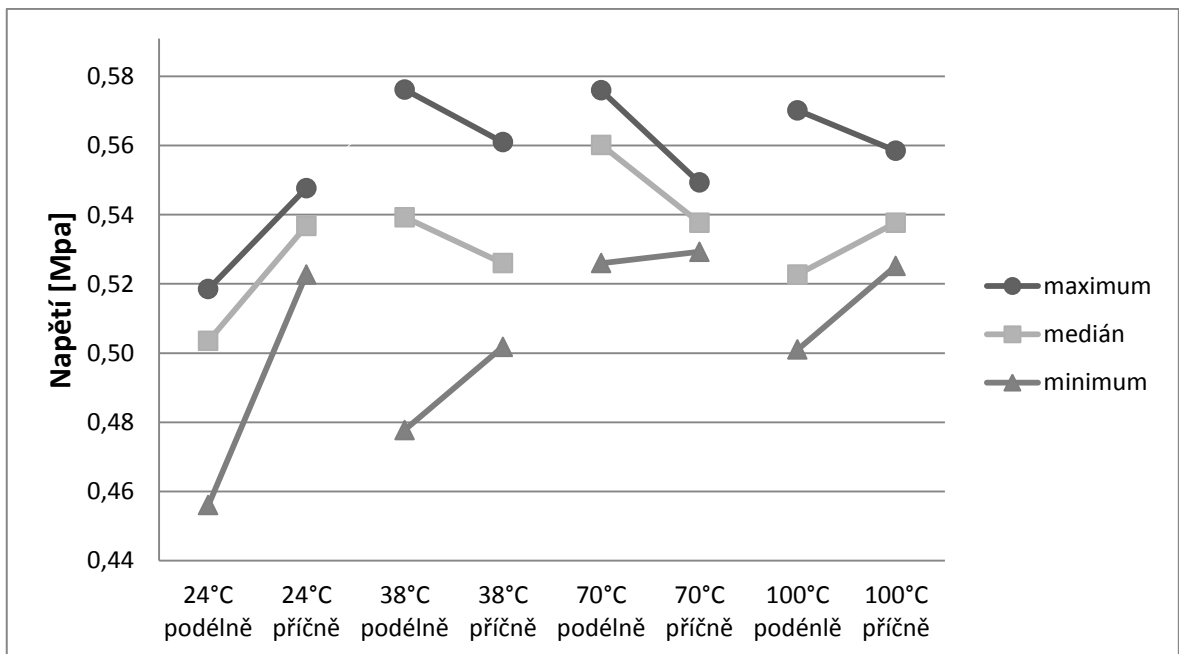
H		podélně	příčně
24°C	maximum	0,5175	0,5467
	medián	0,5025	0,5358
	minimum	0,4550	0,5217
38°C	maximum	0,5752	0,5600
	medián	0,5383	0,5250
	minimum	0,4767	0,5008
70°C	maximum	0,5750	0,5483
	medián	0,5592	0,5367
	minimum	0,5250	0,5283
100°C	maximum	0,5692	0,5575
	medián	0,5217	0,5367
	minimum	0,5000	0,5242



Obr. 24: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál H



Obr. 25: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál H

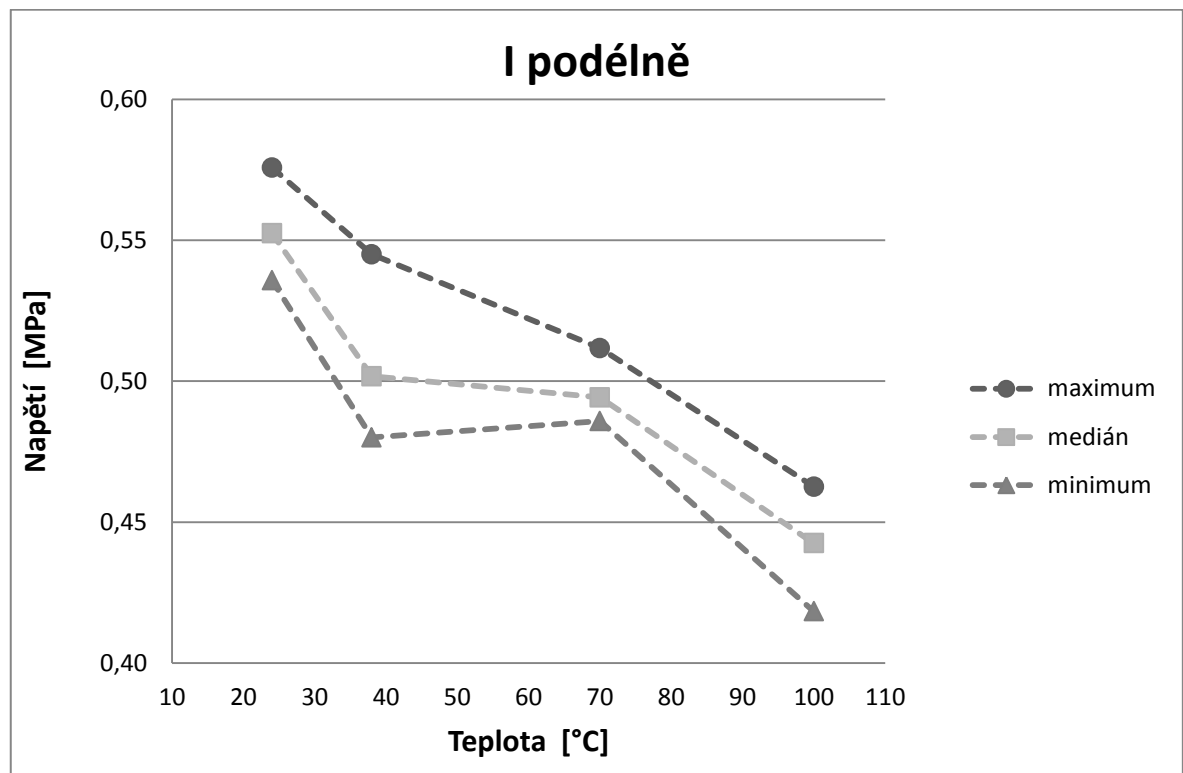


Obr. 26: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu H

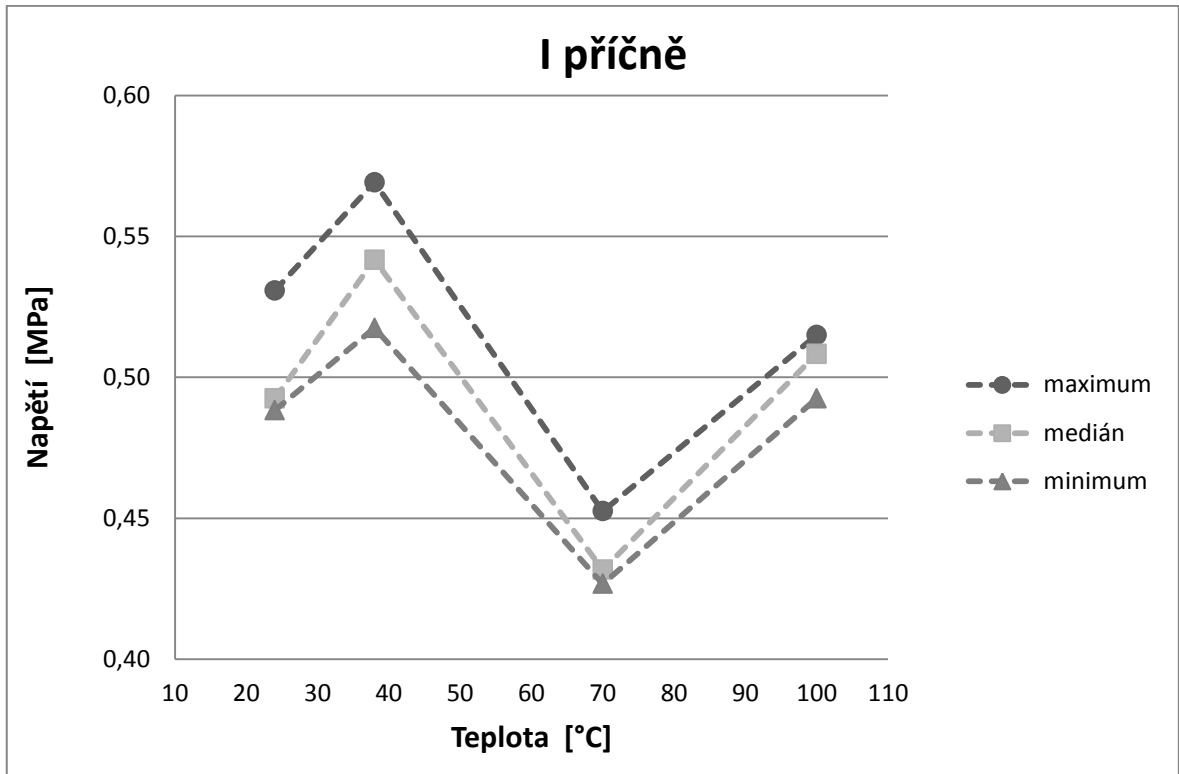
5.7 Materiál I

Tab. 8: Naměřené napětí pro materiál I

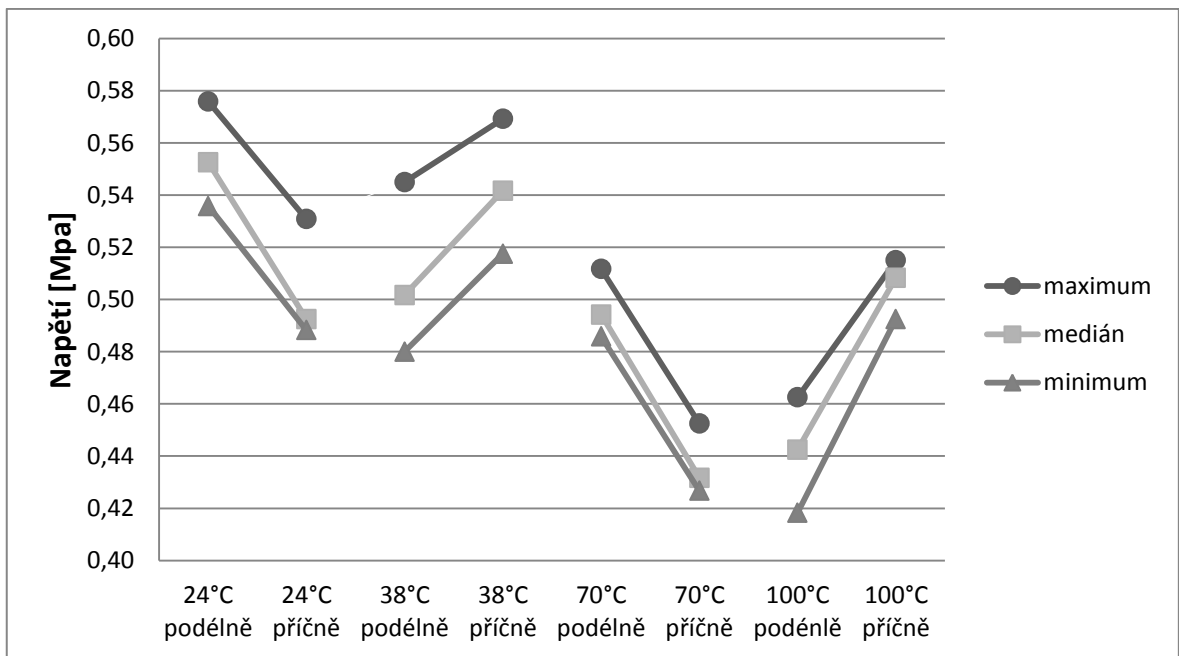
I		podélně	příčně
24°C	maximum	0,5758	0,5308
	medián	0,5525	0,4925
	minimum	0,5358	0,4883
38°C	maximum	0,5450	0,5692
	medián	0,5017	0,5417
	minimum	0,4800	0,5175
70°C	maximum	0,5117	0,4525
	medián	0,4942	0,4317
	minimum	0,4858	0,4267
100°C	maximum	0,4625	0,5150
	medián	0,4425	0,5083
	minimum	0,4183	0,4925



Obr. 27: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál I



Obr. 28: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál I

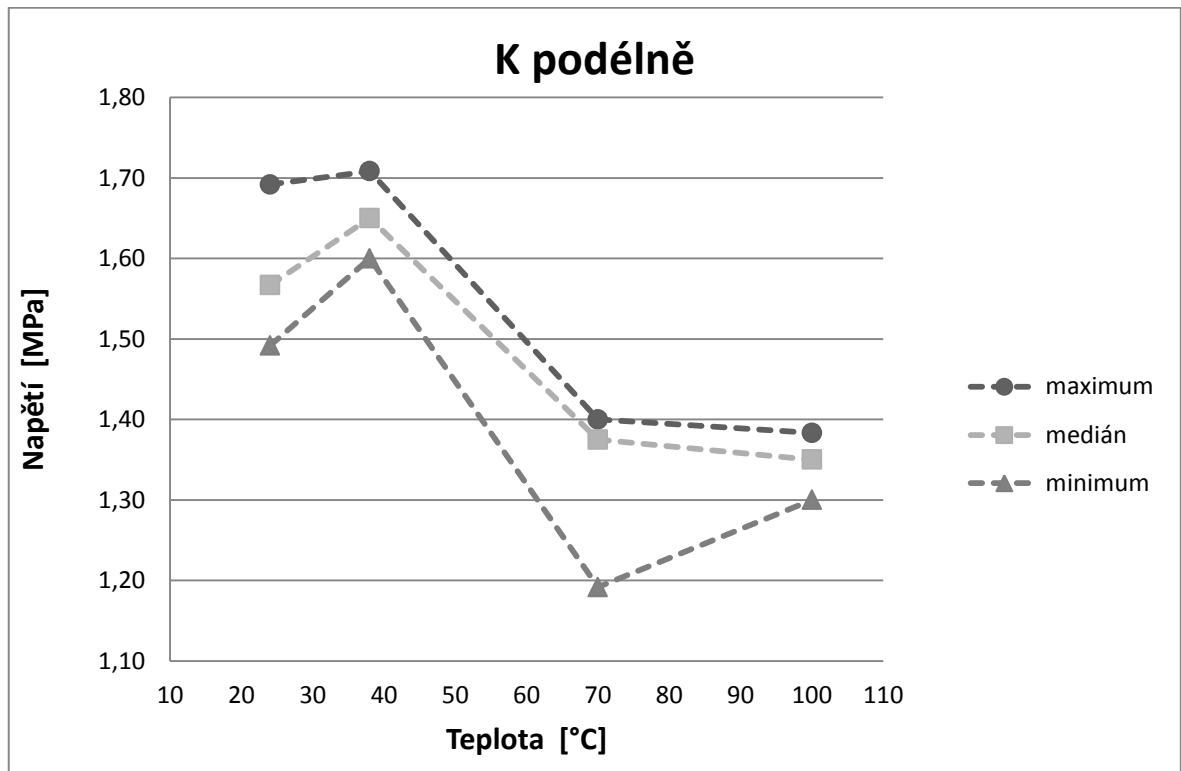


Obr. 29: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu I

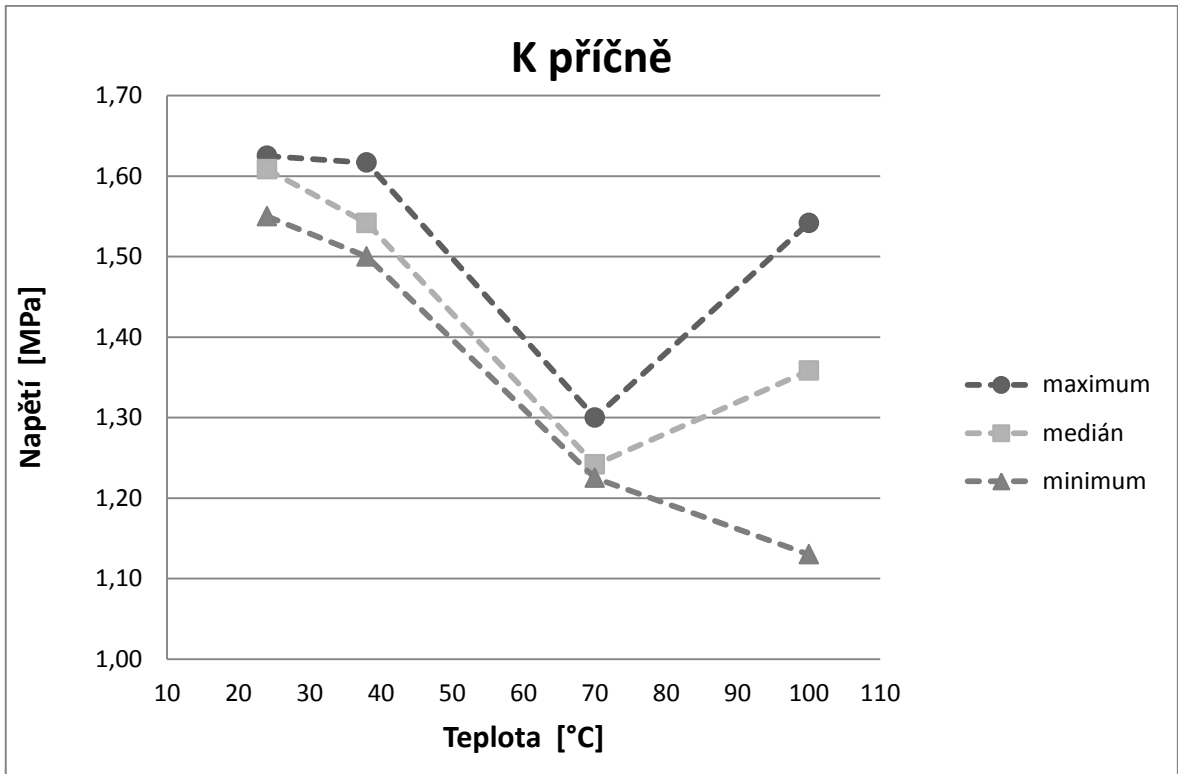
5.8 Materiál K

Tab. 9: Naměřené napětí pro materiál K

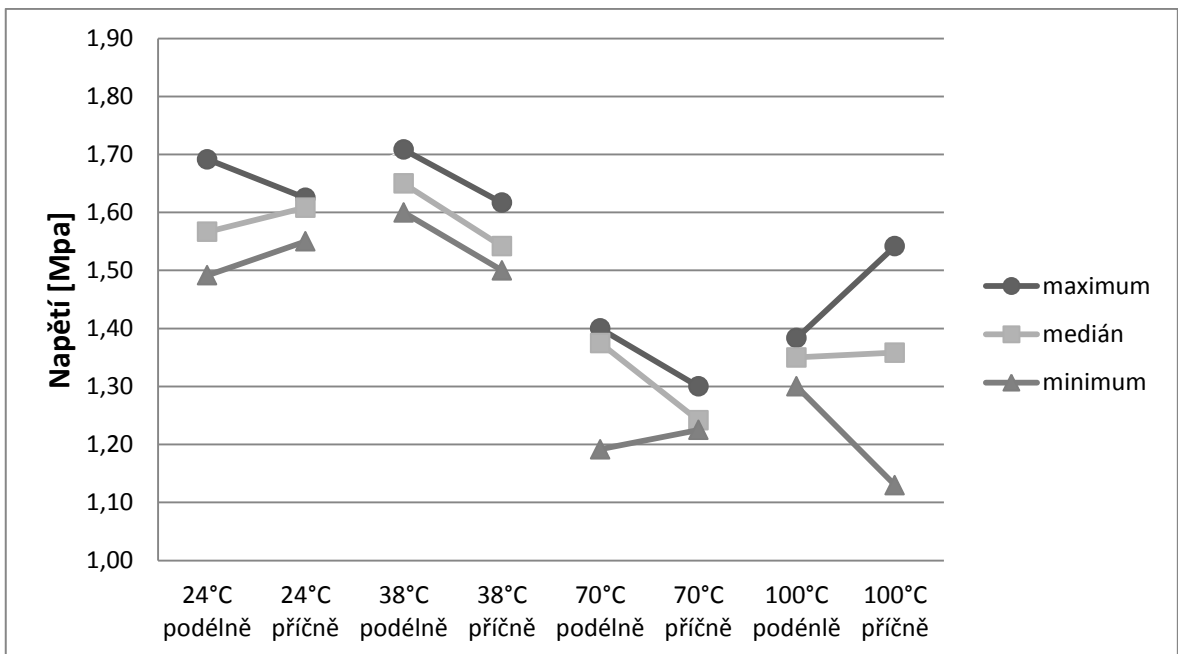
K		podélně	příčně
24°C	maximum	1,6917	1,6250
	medián	1,5667	1,6083
	minimum	1,4917	1,5500
38°C	maximum	1,7083	1,6167
	medián	1,6500	1,5417
	minimum	1,6000	1,5000
70°C	maximum	1,4000	1,3000
	medián	1,3750	1,2417
	minimum	1,1917	1,2250
100°C	maximum	1,3833	1,5417
	medián	1,3500	1,3583
	minimum	1,3000	1,1300



Obr. 30: Závíslost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál K



Obr. 31: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál K

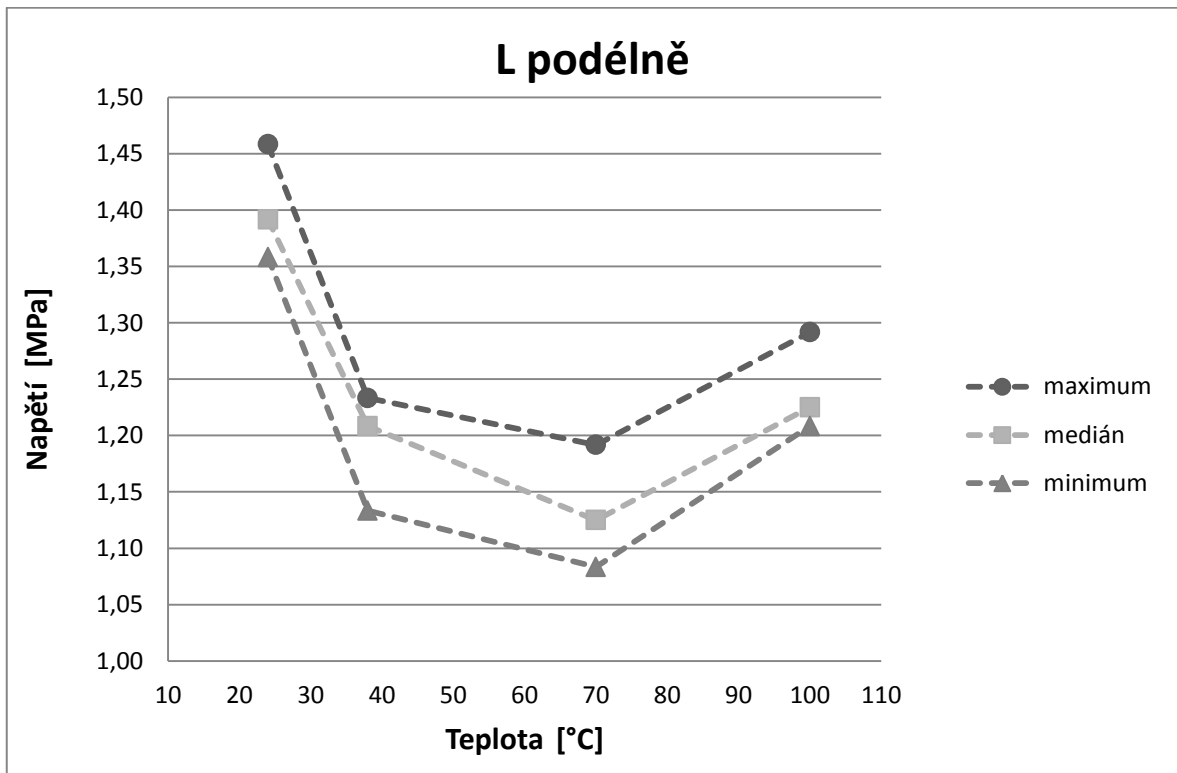


Obr. 32: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu K

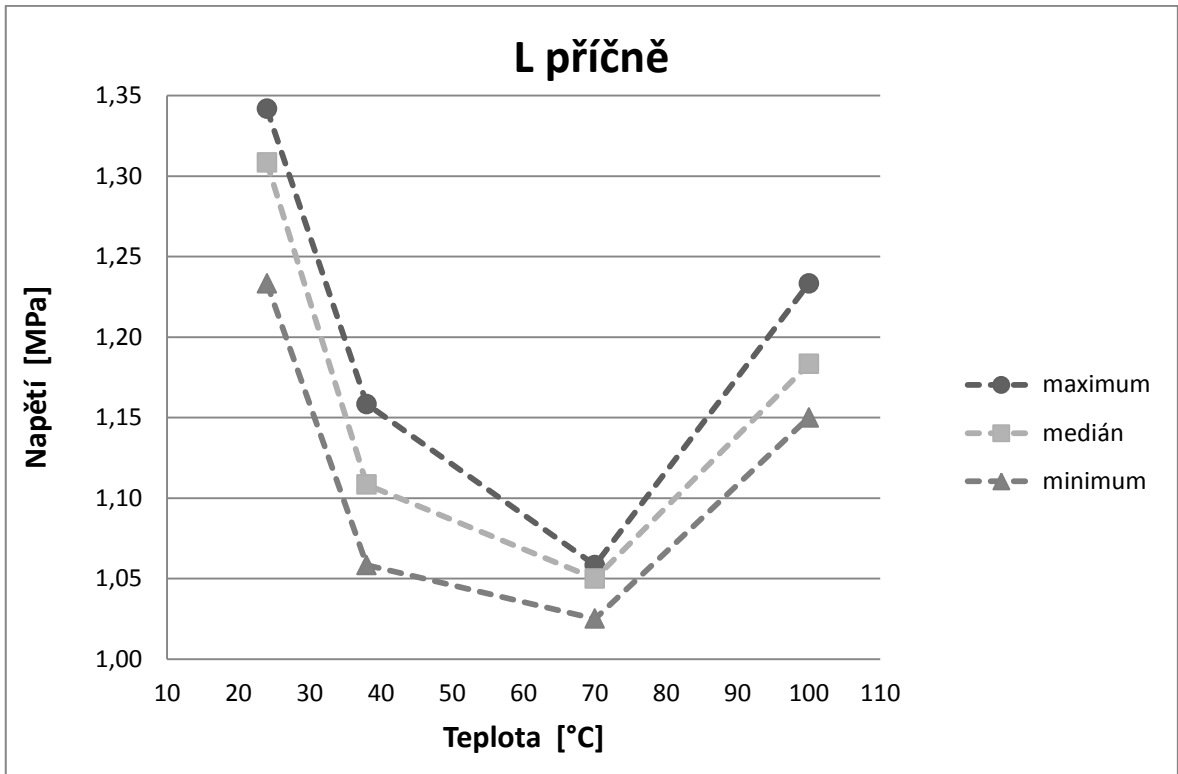
5.9 Materiál L

Tab. 10: Naměřené napětí pro materiál L

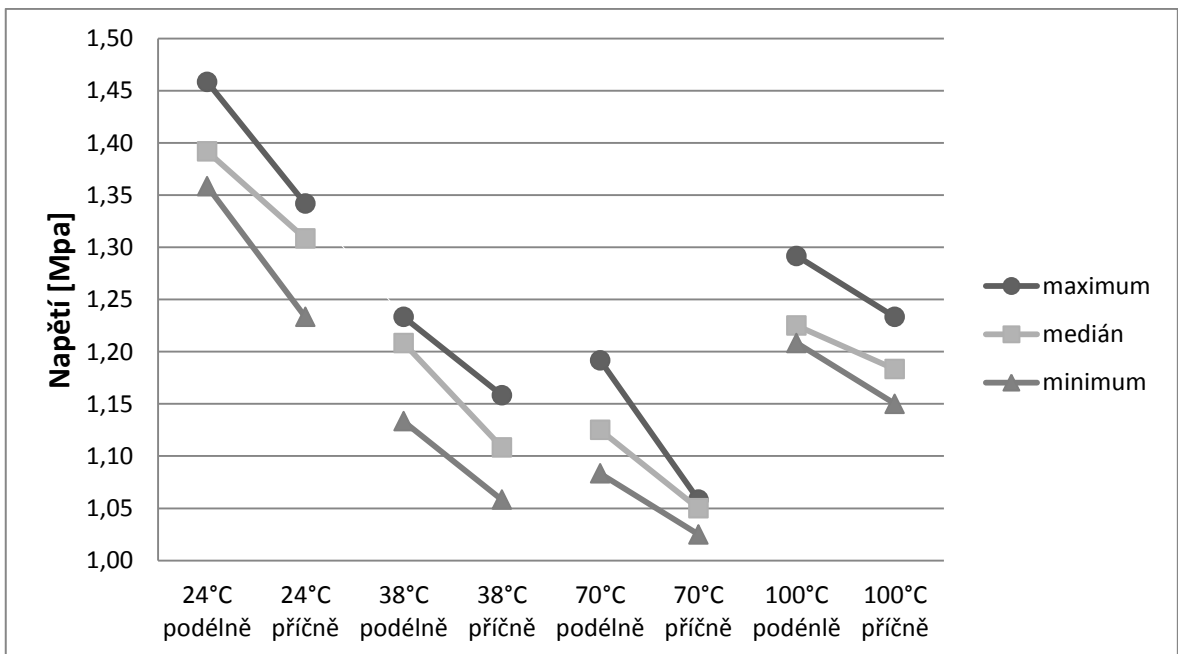
L		podélně	příčně
24°C	maximum	1,4583	1,3417
	medián	1,3917	1,3083
	minimum	1,3583	1,2333
38°C	maximum	1,2333	1,1583
	medián	1,2083	1,1083
	minimum	1,1333	1,0583
70°C	maximum	1,1917	1,0583
	medián	1,1250	1,0500
	minimum	1,0833	1,0250
100°C	maximum	1,2917	1,2333
	medián	1,2250	1,1833
	minimum	1,2083	1,1500



Obr. 33: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál L



Obr. 34: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál L

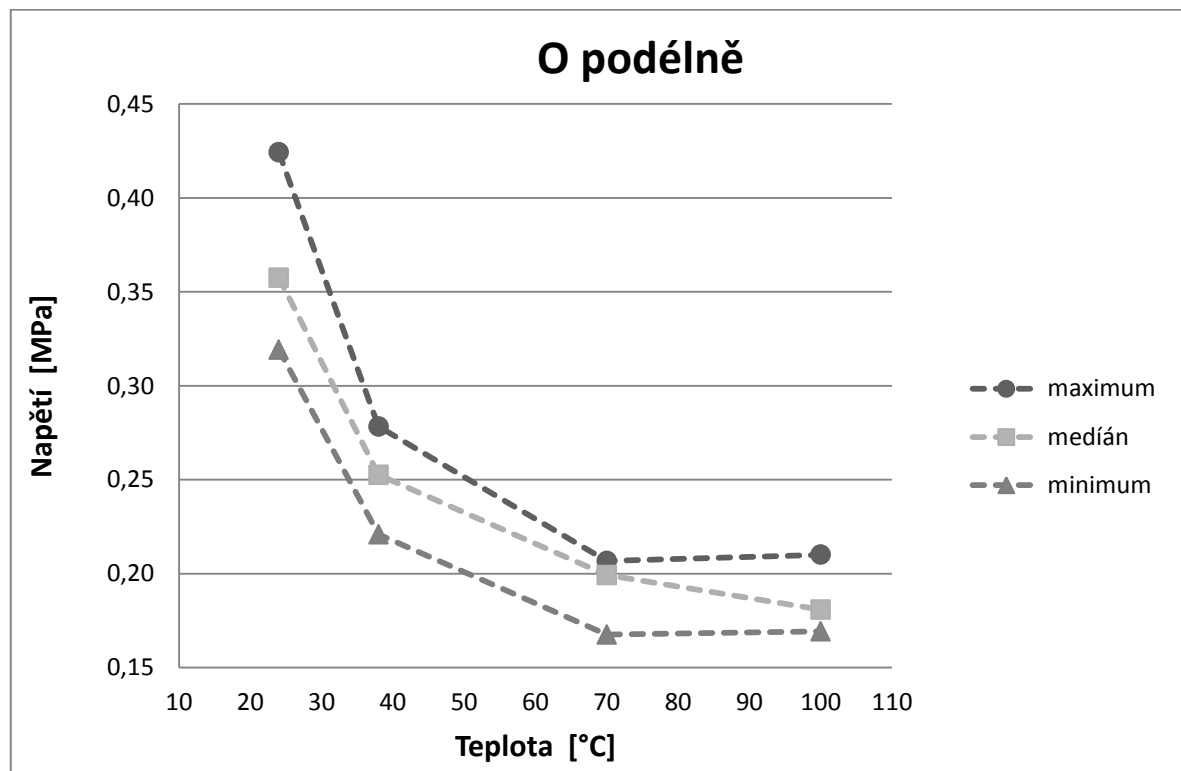


Obr. 35: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu L

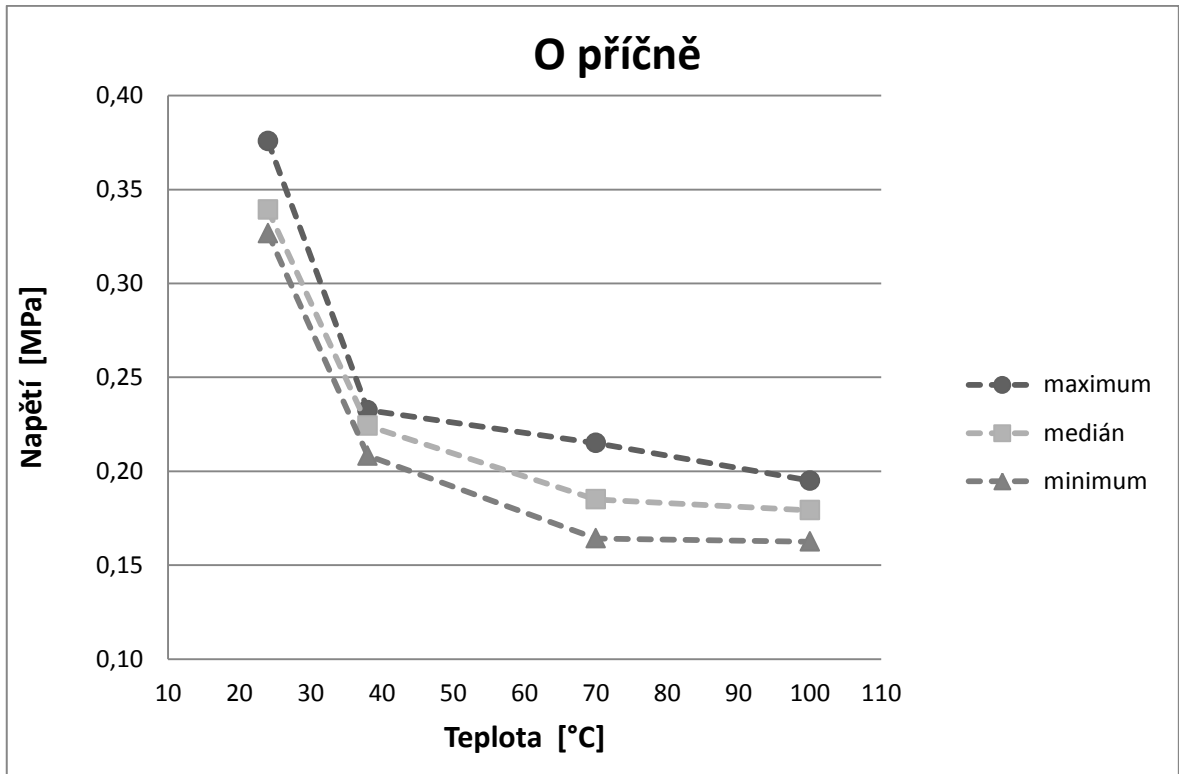
5.10 Materiál O

Tab. 11: Naměřené napětí pro materiál O

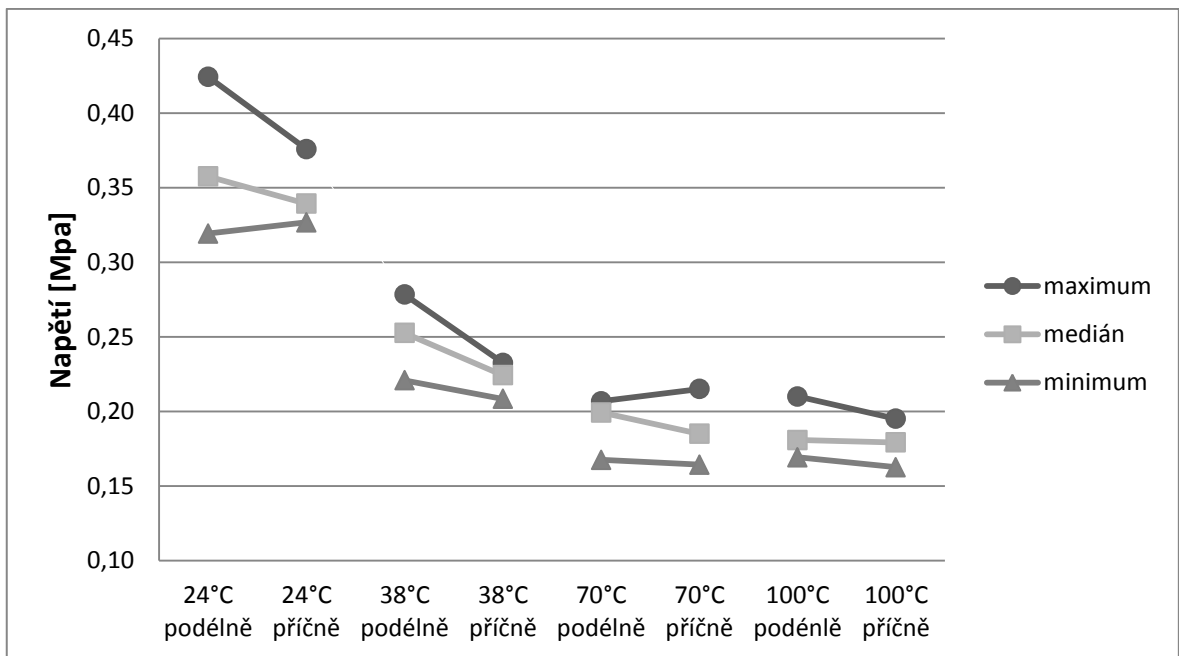
O		podélně	příčně
24°C	maximum	0,4242	0,3758
	medián	0,3575	0,3392
	minimum	0,3192	0,3267
38°C	maximum	0,2783	0,2325
	medián	0,2525	0,2242
	minimum	0,2208	0,2083
70°C	maximum	0,2067	0,2150
	medián	0,1992	0,1850
	minimum	0,1675	0,1642
100°C	maximum	0,2100	0,1950
	medián	0,1808	0,1792
	minimum	0,1692	0,1625



Obr. 36: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál O



Obr. 37: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál O

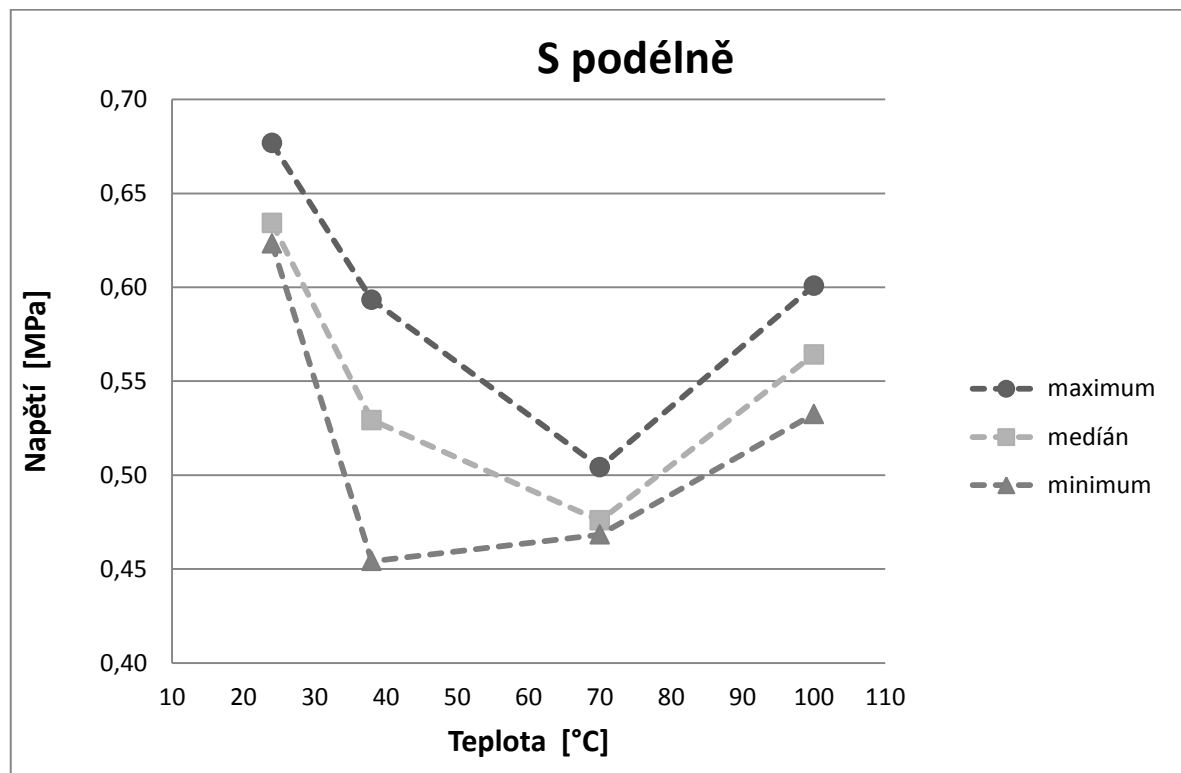


Obr. 38: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu O

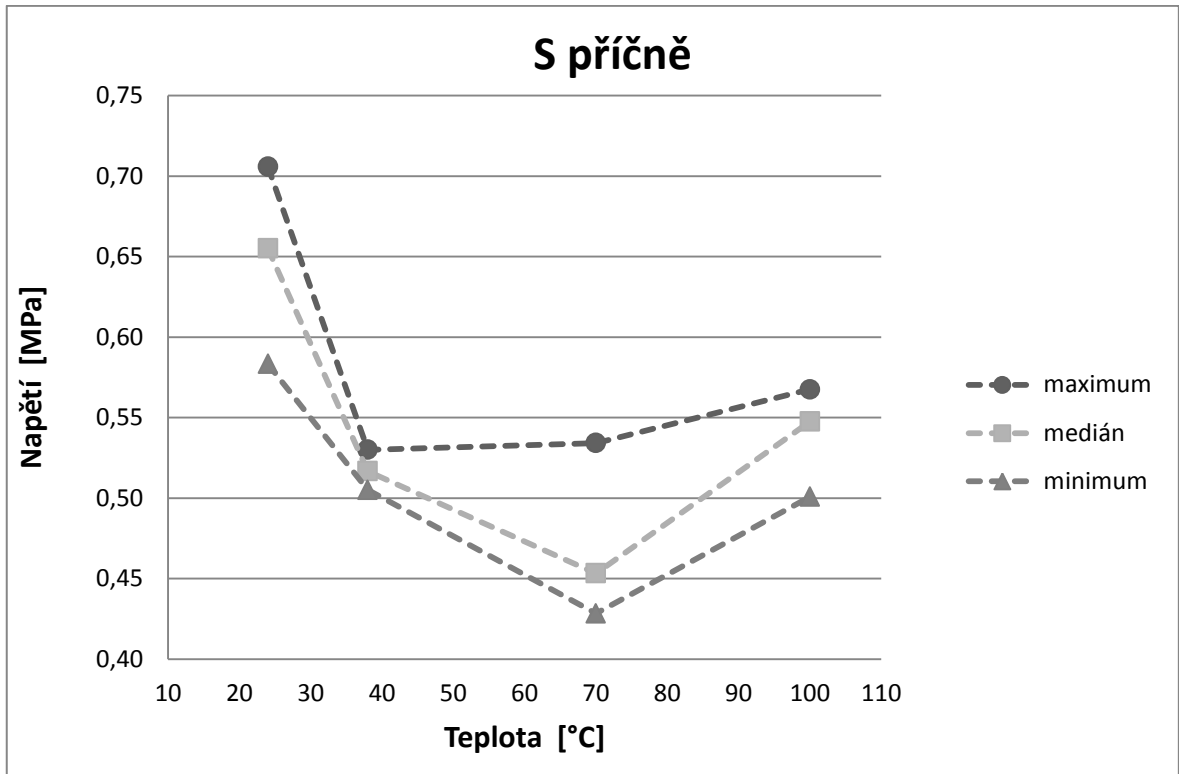
5.11 Materiál S

Tab. 12: Naměřené napětí pro materiál S

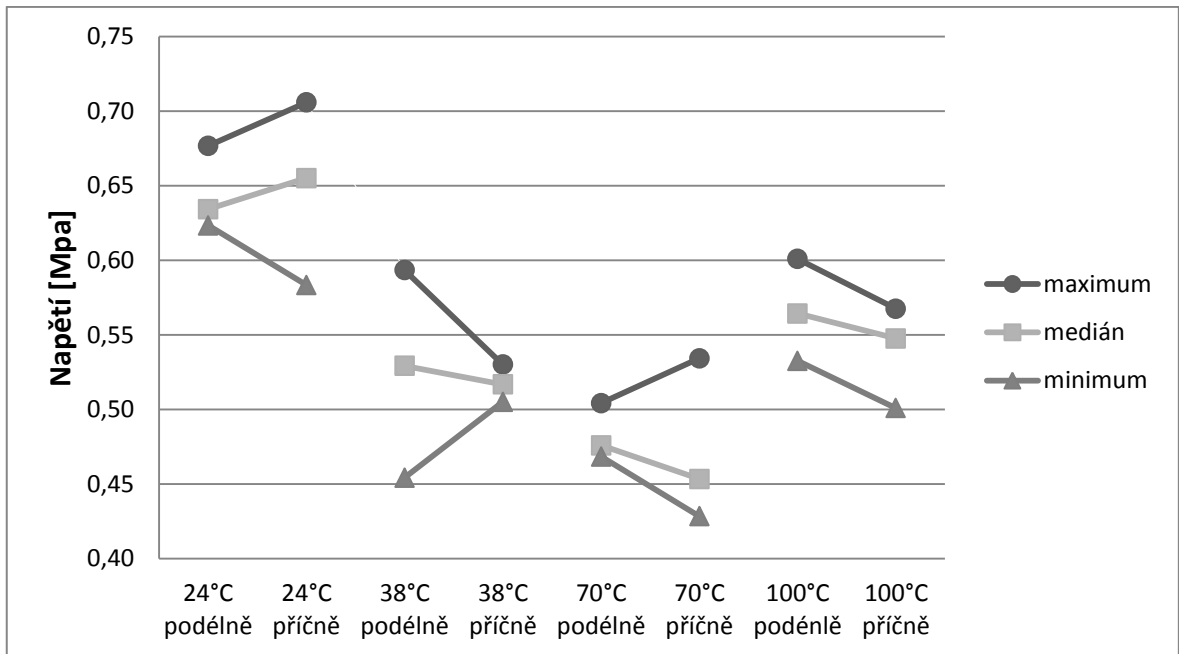
S		podélně	příčně
24°C	maximum	0,6767	0,7058
	medián	0,6342	0,6550
	minimum	0,6233	0,5833
38°C	maximum	0,5933	0,5300
	medián	0,5292	0,5167
	minimum	0,4542	0,5050
70°C	maximum	0,5042	0,5342
	medián	0,4758	0,4533
	minimum	0,4683	0,4283
100°C	maximum	0,6008	0,5675
	medián	0,5642	0,5475
	minimum	0,5325	0,5008



Obr. 39: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál S

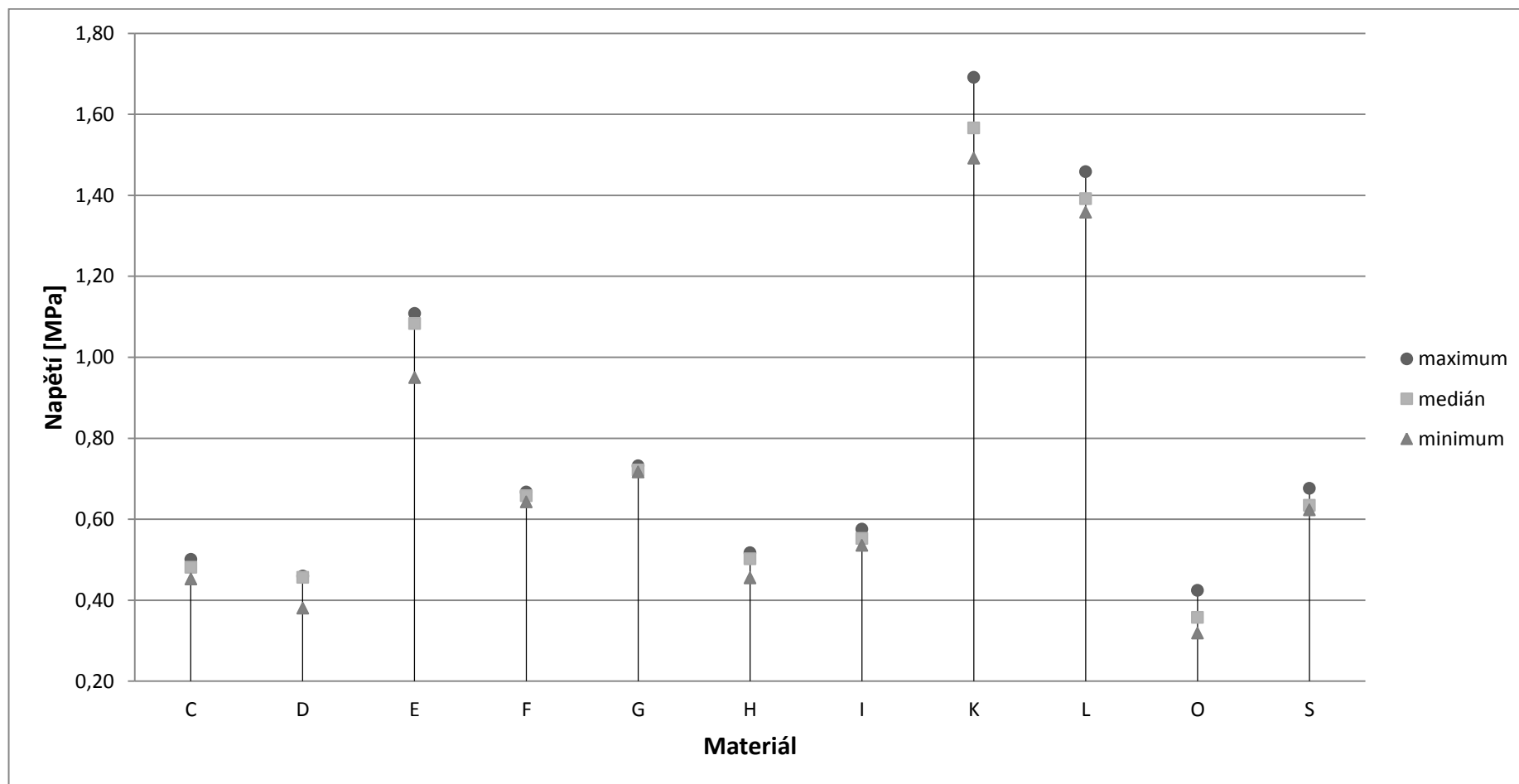


Obr. 40: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál S

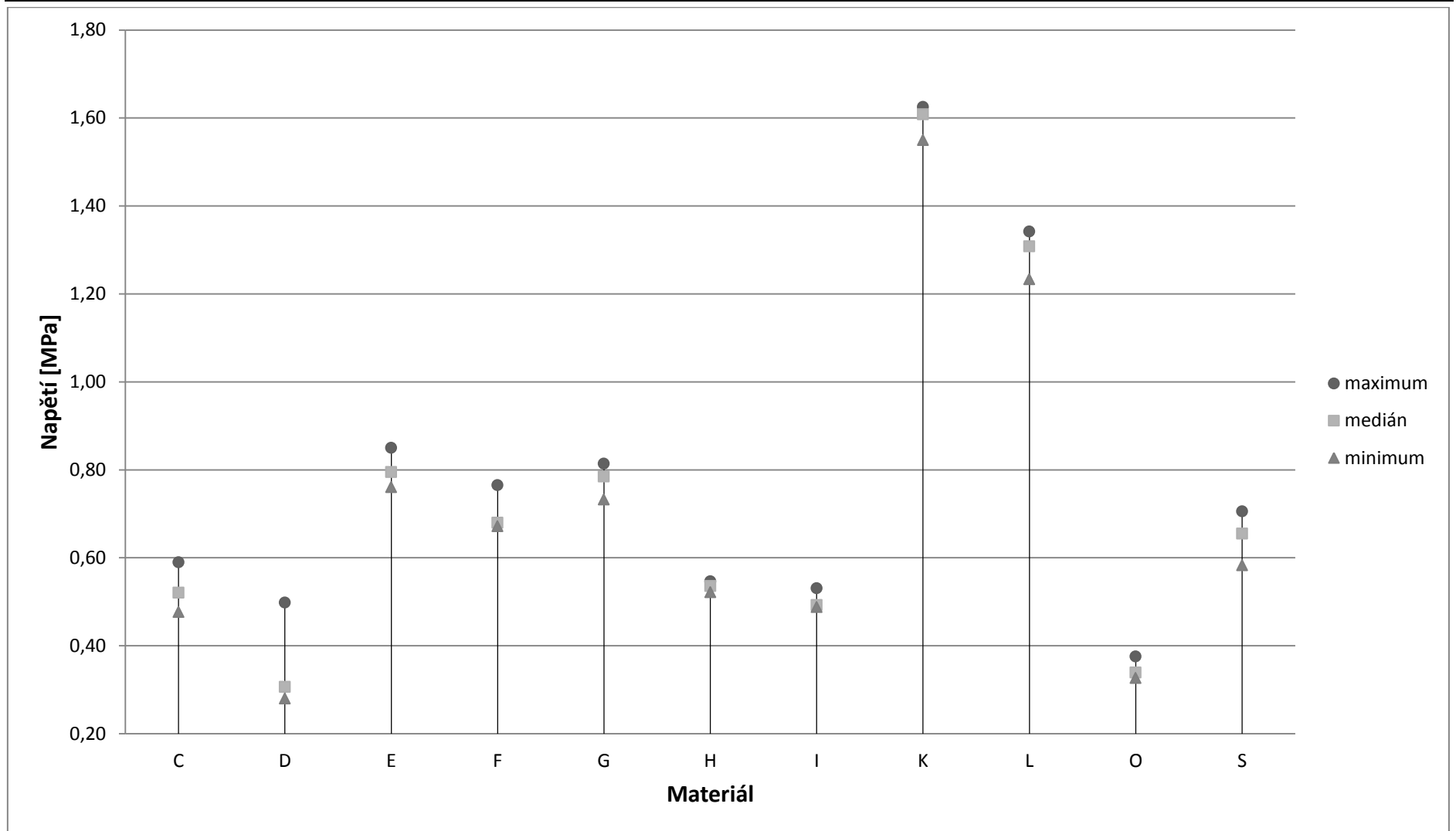


Obr. 41: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu S

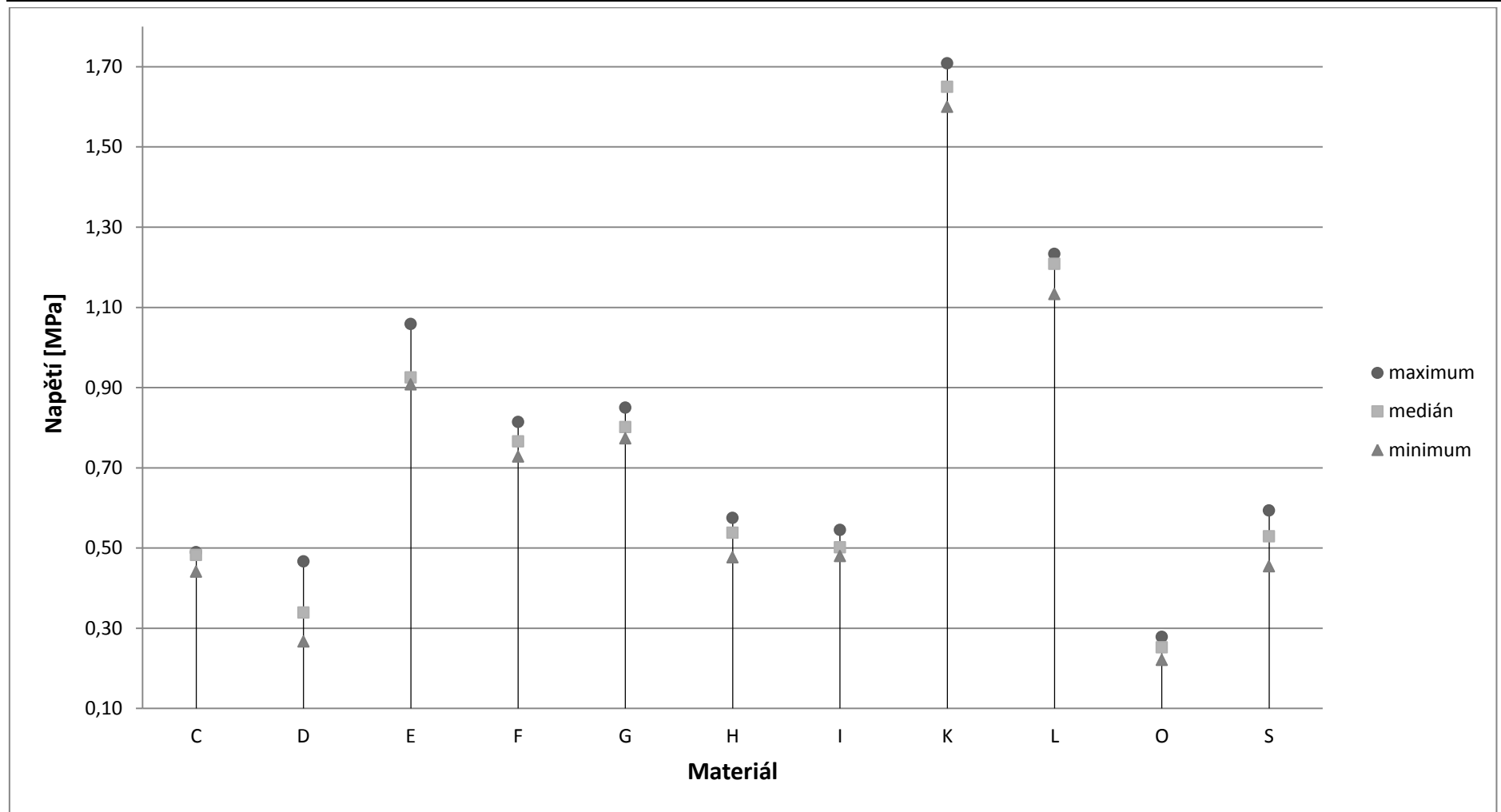
5.12 Srovnání výsledků pro jednotlivé materiály



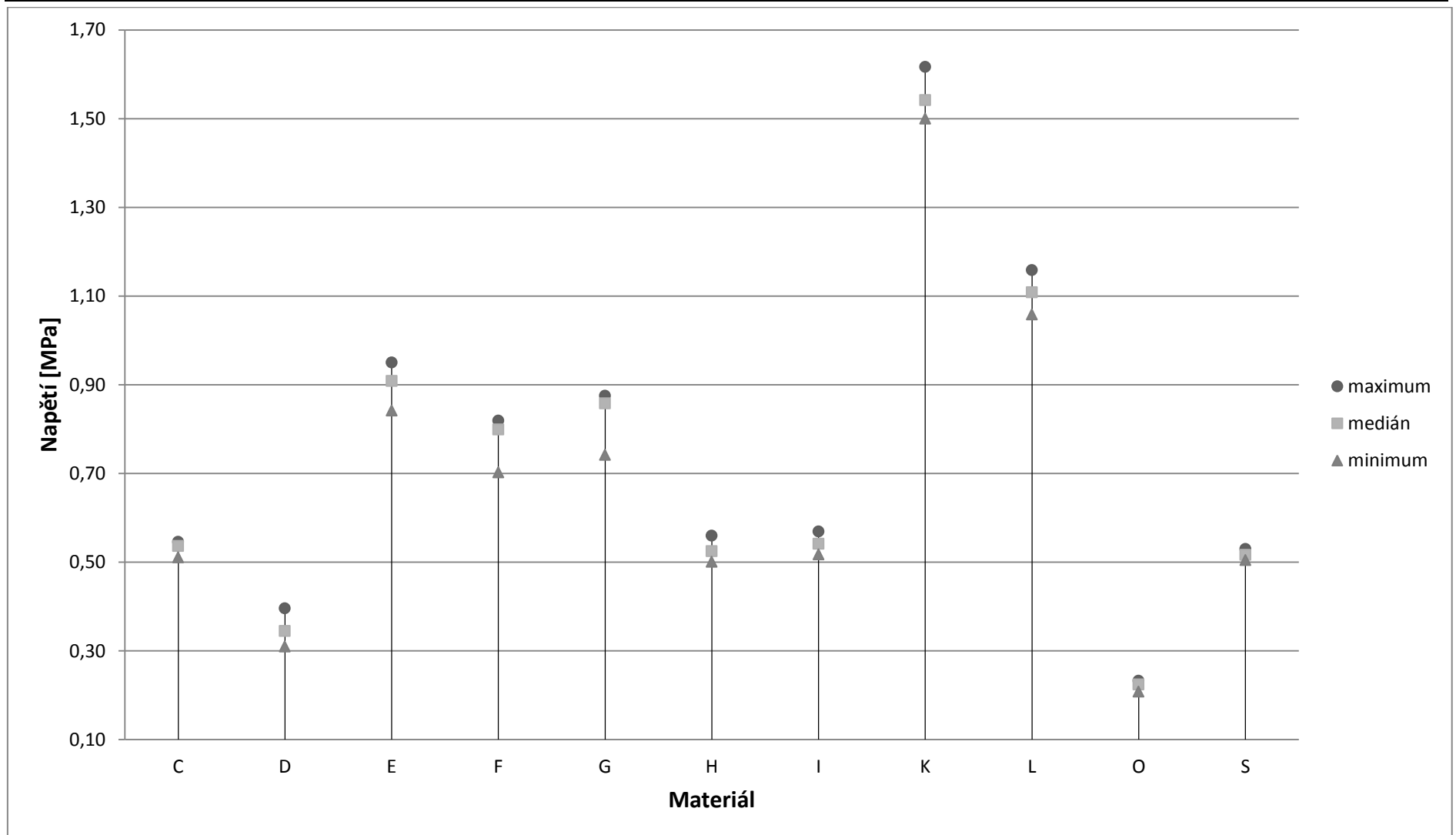
Obr. 42: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 24°C



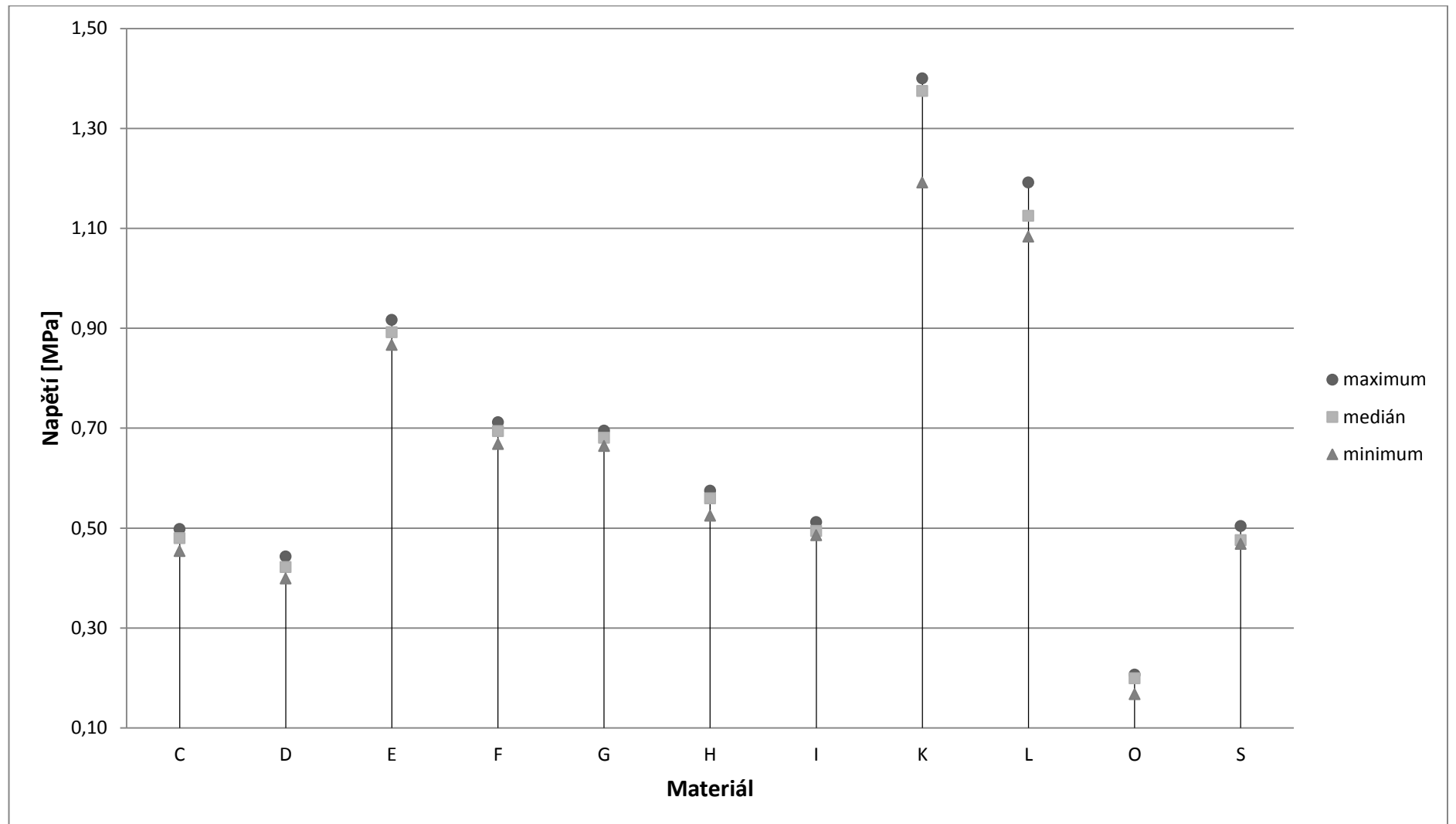
Obr. 43: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 24°C



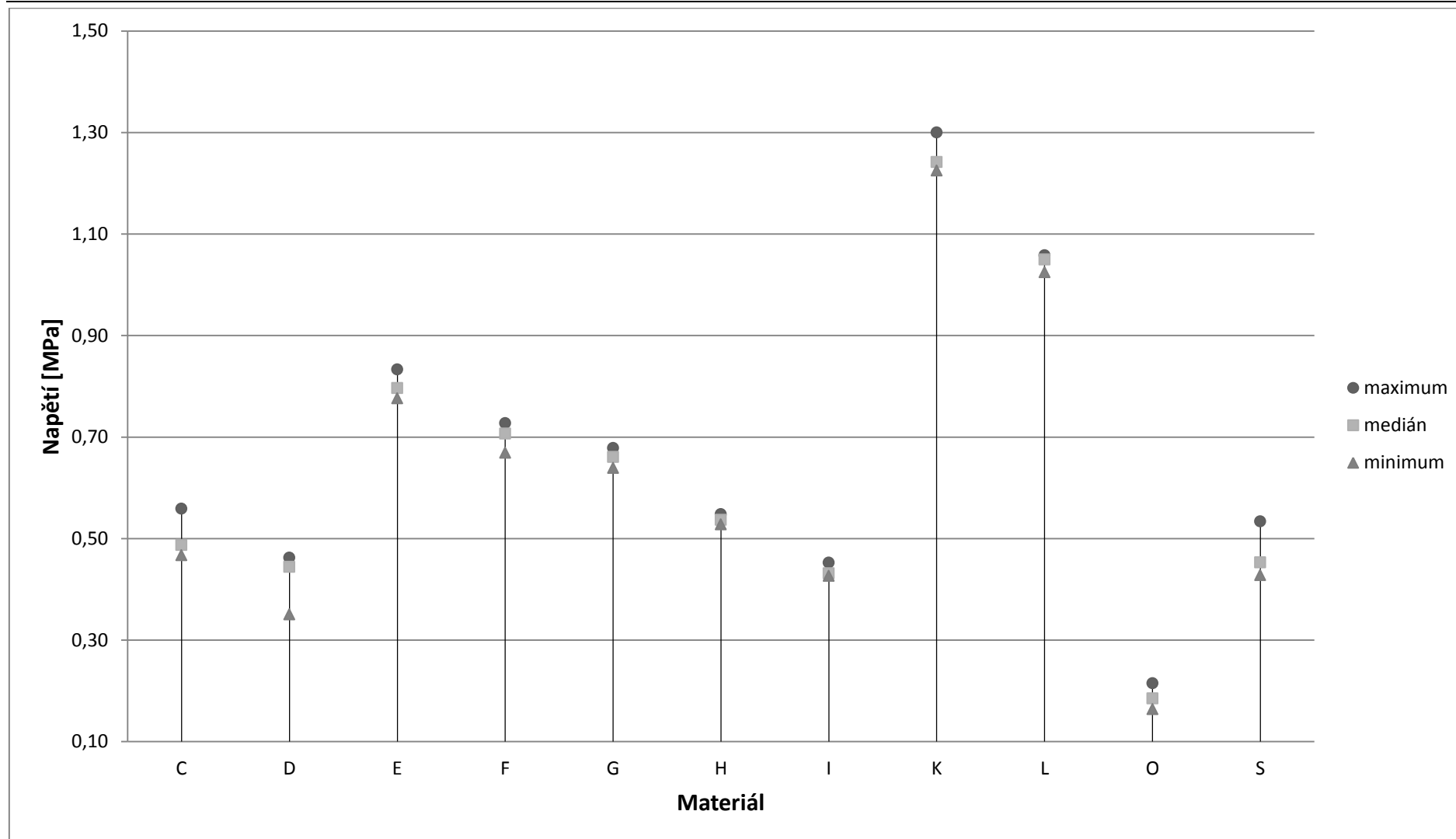
Obr. 44: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 38°C



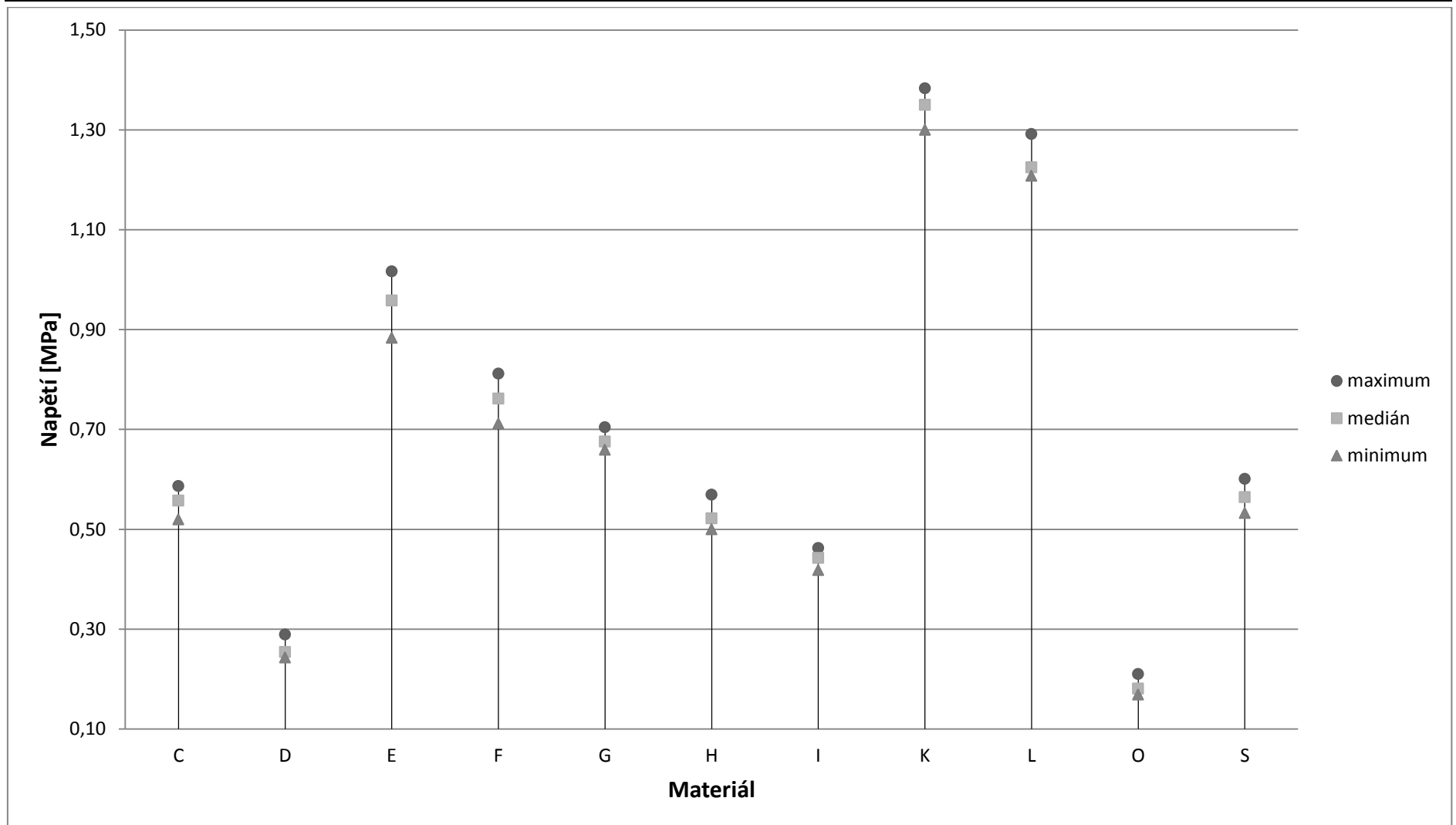
Obr. 45: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 38°C



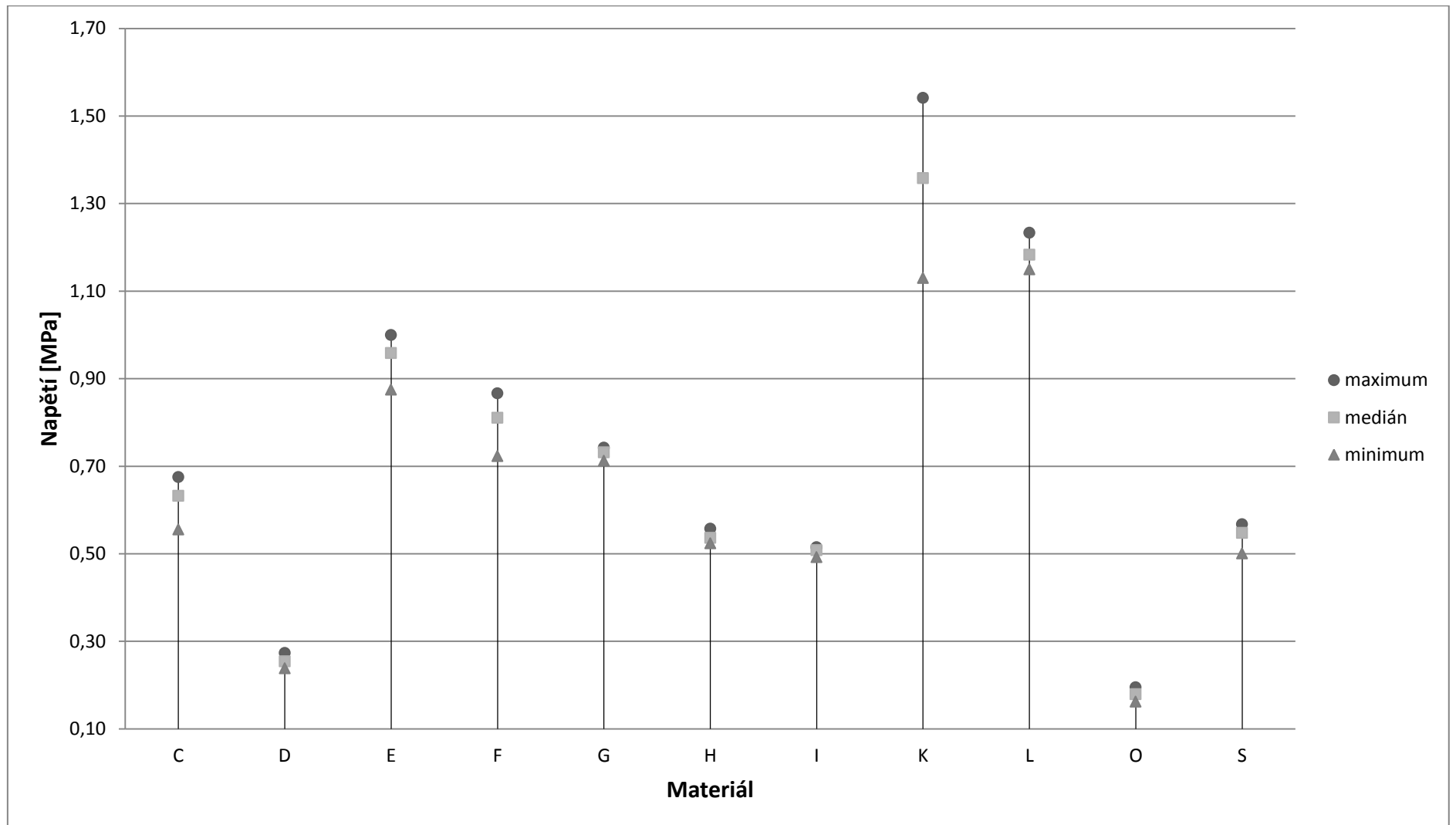
Obr. 46: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 70°C



Obr. 47: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 70°C



Obr. 48: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 100°C



Obr. 49: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 100°C

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z naměřených hodnot zpracovaných do grafů lze určit charakteristiky jednotlivých materiálu při daných teplotách. U tužších materiálů bylo zapotřebí větší síly k dosažení modulu 30%, na rozdíl od měkčího materiálu, kde k dosažení daného protažení bylo použito menší síly.

Je patrné, že svou roli při dalším zpracování těchto materiálu hraje i směr tažení.

Při měření materiálu se projevovalo i jeho složení, které bylo zřetelné na výsledné hodnotě.

U většiny materiálu se průběh hodnot s rostoucí teplotou snižuje a při dosažení teploty 70°C opět narůstá.

Materiály se stejným složením kaučuku vykazují velmi podobný průběh v příčném i podélném směru. Mírné odchylky jsou způsobeny množstvím sazí obsažených v daných vzorcích. Například u materiálu D, E, F.

Shodnost grafů v podélném i příčném směru, můžeme sledovat u dvou materiálů.

Největšího modulu pro teplotu 24°C v podélném směru dosahuje materiál K. Tyto hodnoty se v příčném směru nepatrně liší od hodnot ve směru podélném. U dalších teplot tyto hodnoty jen mírně klesají.

Naopak nejmenšího modulu pro teplotu 24°C v podélném směru dosahuje materiál O. U tohoto materiálu můžeme sledovat, že hodnoty v příčném a podélném směru jsou zcela totožné. S rostoucí teplotou hodnoty taktéž klesají.

Také je zajímavé srovnání podélného a příčného směru co se týče hodnot modulu při teplotě 24°C.

U materiálu C, F, G, H je modulu v příčném směru větší než ve směru podélném.

U těchto materiálů E, I, K, L jsou hodnoty modulu v příčném směru menší, než hodnoty modulu v podélném směru.

A u materiálu D, O, S jsou hodnoty v příčném směru téměř shodné s hodnotami v podélném směru.

ZÁVĚR

Měření probíhalo v laboratořích UTB. Účelem měření bylo zjistit vlastnosti testovaných materiálů.

Testování se provádělo na 11 vzorcích tahovou zkouškou při čtyřech odlišných teplotách. Materiálem pro vzorky byly různé druhy kaučuků s odlišnými vlastnostmi, kdy z každého druhu kaučuku byly vzorky vysekány v podélném i příčném směru. Testovaný materiál se upnul do trhacího stroje, kde byl cyklicky namáhán. Z výsledných hodnot byly zpracovány výše uvedené grafy, ze kterých můžeme vyčíst závislosti napětí a poměrného prodloužení.

Tyto hodnoty jsou důležité pro další zpracování kaučuků a jejich následné užití ve výrobě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] Ing. Jakub Javořík, Ph.D., *Hyperelasticita*, učební text
- [3] MALÁČ, Jiří. *Procesy zpracování polymerů II.: Gumárenská technologie - 2 kaučuky* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.utb.cz/file/36214>
- [4] Harper, Ch., A. *Handbook of plastics and elastomers*. New York, USA: McGraw-Hill, 1975. 1000s. ISBN 0-07-026681-6
- [5] Morton, M. *Rubber technology*. 2. vyd. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1973. 603s.
- [6] Kohnke, P. ANSYS – *Theory reference*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 1998. 965s.
- [7] JANČÍK, Marek. *Zkoušení hyperelastických materiálů*. Zlín, 2005. Bakalářská práce. UTB.
- [8] ČSN ISO 37: *Přez z vulkanizovaných nebo termoplastických kaučuků – Stanovení tahových vlastností*.
- [9] HOLUB, Josef. 1967. *Přez jako konstrukční materiál*. Praha: Nakladatelství technické literatury.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

W	Měrná deformační energie [J/m^3]
I_i	Deformační invariant pro materiálové modely
c_{ij}	Materiálová konstanta
E	Modul pružnosti [MPa]
μ_i	Materiálová konstanta
α_i	Materiálová konstanta
λ_i	Poměrné prodloužení [%]
σ_{ij}	Napětí ve směru ij [MPa]
E_{ij}	Langrangeův deformační tenzor
ε_i	Poměrná deformace
δ	Tažnost [%]
L	Délka pracovní části po protažení [mm]
L_0	Původní délka pracovní části [mm]
F	Zatěžovací síla [N]
s	Plocha průřezu pracovní části [mm^2]
t	Tloušťka zkušební vzorku [mm]
x	Aritmetický průměr
p	Tlak [MPa]
v	Variační koeficient [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Jednoosá napjatost	17
Obr. 2: Dvouosá napjatost	18
Obr. 3: Čistý smyk	20
Obr. 4: Křivka zatížení – deformace	25
Obr. 5: Vliv teploty ba velikost modulu pružnosti v tlaku, na velikost trvalé deformace	27
Obr. 6: Velikost modulu pružnosti v tlaku v závislosti na teplotě pro přírodní kaučuk	27
Obr. 7: Modul 30%	31
Obr. 8: Tvar oboustranných lopatek	32
Obr. 9: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál C	35
Obr. 10: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál C	36
Obr. 11: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu C	36
Obr. 12: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál D	37
Obr. 13: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál D	38
Obr. 14: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu D	38
Obr. 15: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál E	39
Obr. 16: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál E	40
Obr. 17: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu E	40
Obr. 18: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál F	41
Obr. 19: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál F	42
Obr. 20: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu F	42
Obr. 21: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál G	43
Obr. 22: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál G	44
Obr. 23: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu	44
Obr. 24: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál H	45
Obr. 25: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál H	46
Obr. 26: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu H	46
Obr. 27: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál I	47
Obr. 28: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál I	48
Obr. 29: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu I	48
Obr. 30: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál K	49
Obr. 31: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál K	50

Obr. 32: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu K	50
Obr. 33: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál L.....	51
Obr. 34: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál L	52
Obr. 35: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu L.....	52
Obr. 36: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál O	53
Obr. 37: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál O.....	54
Obr. 38: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu O	54
Obr. 39: Závislost napětí na teplotě v podélném směru pro materiál S.....	55
Obr. 40: Závislost napětí na teplotě v příčném směru pro materiál S	56
Obr. 41: Rozptyl hodnot při jednotlivých teplotách materiálu S.....	56
Obr. 42: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 24°C	57
Obr. 43: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 24°C	58
Obr. 44: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 38°C	59
Obr. 45: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 38°C	60
Obr. 46: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 70°C	61
Obr. 47: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 70°C	62
Obr. 48: Výsledky měření všech materiálů v podélném směru při teplotě 100°C	63
Obr. 49: Výsledky měření všech materiálů v příčném směru při teplotě 100°C	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek	33
Tab. 2: Naměřené napětí pro materiál C	35
Tab. 3: Naměřené napětí pro materiál D	37
Tab. 4: Naměřené napětí pro materiál E	39
Tab. 5: Naměřené napětí pro materiál F	41
Tab. 6: Naměřené napětí pro materiál G	43
Tab. 7: Naměřené napětí pro materiál H	45
Tab. 8: Naměřené napětí pro materiál I	47
Tab. 9: Naměřené napětí pro materiál K	49
Tab. 10: Naměřené napětí pro materiál L	51
Tab. 11: Naměřené napětí pro materiál O	53
Tab. 12: Naměřené napětí pro materiál S	55

